Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

На правах рукописи

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

Диссертация

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент,

Обухов Сергей Геннадьевич

<b>ОГЛАВЛЕНИЕ</b>	1
-------------------	---

ОГЛАВЛЕНИЕ
ВВЕДЕНИЕ
1. АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ И СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ13
1.1. Обзор текущего состояния и перспектив развития возобновляемой энергетики 13
1.2. Сравнительный анализ способов повышения эффективности фотоэлектрических станций
1.3. Обзор и сравнительный анализ метолов отслеживания точки максимальной
мощности солнечных батарей
1.3.1 Методы отслеживания точки максимальной мощности при равномерном освещении солнечных батарей
1.3.2 Методы отслеживания точки максимальной мощности при частичном затенении солнечных батарей
1.4. Применение эволюционных алгоритмов для отслеживания точки максимальной
мощности солнечных батарей40
1.4.1 Обзор эволюционных алгоритмов и областей их практического применения 40
1.4.2 Описание алгоритма роя частиц
1.4.3 Описание алгоритма поиска кукушки 48
1.4.4 Проблемы применения эволюционных алгоритмов в контроллерах максимальной мощности
1.5. Обзор и сравнительный анализ методов оптимизации состава оборудования
гибридных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии 54
1.6. Выводы по разделу

2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КОМПОНЕНТОВ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ	Í
СТАНЦИИ	
2.1. Обоснование и выбор методов исследования60	
2.2. Модель солнечной батареи	
2.3. Модель DC-DC преобразователя	
2.3.1 Схемы построения и принцип действия преобразователей напряжения	
2.3.2 Математические модели преобразователей напряжения в Matlab/Simulink 77	
2.4. Модель электрической нагрузки DC-DC преобразователя	
2.5. Модель контроллера поиска точки максимальной мощности	
2.6. Общая модель фотоэлектрической станции	
2.7. Выводы по разделу90	
3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИК ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ АЛГОРИТМОВ И	
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ КОНТРОЛЛЕРОВ МАКСИМАЛЬНО	Й
МОЩНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ91	
3.1. Анализ режимов и условий согласования параметров солнечной батареи с	
параметрами преобразователя напряжения контроллера максимальной мощности .91	
3.2. Разработка методик проектирования и выбора параметров преобразователей	
напряжения фотоэлектрических станций98	
3.2.1 Методика расчета и выбора параметров понижающего преобразователя напряжения	
3.2.2 Методика расчета и выбора параметров повышающего преобразователя напряжения	
3.3. Выбор оптимальных параметров алгоритма роя частии для МРРТ контроллеров	
фотоэлектрических станций	
3.4. Выволы по разлелу 126	

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦ	ИЙ И
АПРОБАЦИЯ ПРЕДЛОЖЕННЫХ МЕТОДИК И АЛГОРИТМОВ	128
4.1. Описание объекта и задач исследования	
4.2. Моделирование режимов автономной фотоэлектрической станции в ус	ловиях
равномерного освещения	130
4.3 Моделирование режимов автономной фотоэлектрической станции в усл	ЮВИЯХ
частичного затенения солнечных батарей	138
4.3.1. Выбор параметров DC-DC преобразователя и МРРТ-контроллеров с учет частичного затенения	ом режимов 138
4.3.2 Моделирование режимов фотоэлектрической станции с МРРТ- контролле алгоритма роя частиц	ром на базе 140
4.3.3 Моделирование режимов фотоэлектрической станции с МРРТ- контролле алгоритма поиска кукушки	ром на базе 147
4.3.4 Сравнительный анализ эффективности МРРТ- контроллеров на основе эво	олюционных
и классических алгоритмов	
4.4. Выводы по разделу	155
5. ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ОБОРУДОВАНИЯ ГИБРИДНЫХ СИС	CTEM
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ	ЭНЕРГИИ
5.1. Объект и задачи исследований	157
5.2. Модели компонентов	158
5.3. Методы исследования	166
5.4. Целевая функция и ограничения	168
5.5. Результаты оптимизации	172
5.6. Выводы по разделу	177
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	181
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	183
Приложение А. Акты о внедрении результатов диссертационной работы	195
Приложение Б. Свидетельства о государственной регистрации программ для	ЭВМ
	197

#### введение

Актуальность темы исследования. Важной задачей социальноэкономического 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 техниконеобходимо обеспечить эффективное экономическими показателями преобразование первичной возобновляемой энергии. использование И энергоносителей Стохастический характер первичных нелинейность И генерирующих источников определяют высокую характеристик сложность решения данной задачи, связанной с нахождением наилучшего варианта решения с соблюдением ограничений. С различными критериями И С различных 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 (РФ), 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 ярковыраженная 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 максимальной мощности (Maximum Power Point Tracking -MPPT), который обеспечивает автоматический поиск точки максимальной мощности (MPP) солнечных батарей в режиме реального времени.

Важнейшей характеристикой контроллеров солнечных батарей является используемый ими метод отслеживания МРР. Именно метод отслеживания МРР во

многом определяет эффективность самого контроллера и соответственно ФЭС. Практически все известные промышленные МРРТ контроллеры используют методы поиска МРР 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 МРР 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 являются достоверное прогнозирование задачи мощности, генерируемой возобновляемой выбор установками энергетики, И 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:

- Выполнить сравнительный анализ способов повышения эффективности фотоэлектрических станций и методов отслеживания точки максимальной мощности солнечных батарей.
- Разработать имитационную модель автономной фотоэлектрической станции, обеспечивающую моделирование ее динамических режимов и разработку эффективных алгоритмов управления.
- 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.
- Определить оптимальные параметры эволюционных алгоритмов управления для цифровых контроллеров максимальной мощности фотоэлектрических станций.
- 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 инструмента исследований использовался математический пакет Matlab/Simulink. Научная новизна работы заключается в следующем:

- 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.
- 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, и 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:

- Методика выбора параметров преобразователя напряжения и контроллера поиска точки максимальной мощности фотоэлектрических станций, основанная на анализе энергетических характеристик солнечных батарей.
- Алгоритм роя частиц с оптимизированными параметрами для применения в контроллерах максимальной мощности фотоэлектрических станций с учетом топологии построения электростанции.
- 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 «Энергоресурсоэффективность 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 (ICKEA 2018) Москва, Россия 25-27 июня 2018 г.;

**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.

### 1. АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ И СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

1.1. Обзор текущего состояния и перспектив развития возобновляемой энергетики

Приоритетным направлением развития современной энергетики является использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Очевидными и важными достоинствами ВИЭ являются неисчерпаемость, доступность и экологическая чистота. Из всех известных видов ВИЭ наибольшим потенциалом обладают энергия ветра и солнечного излучения, которые широко используются для получения тепла и электричества [1-3].

На рисунке 1.1 представлена диаграмма мирового производства электрической энергии различными источниками с прогнозом на ближайшие тридцать лет, построенная по данным Международного энергетического агентства (EIA), которое объединяет статистические данные о ВИЭ, производстве и потреблении энергии в различных секторах экономики [4].





Из рисунка 1.1 хорошо видно, что ВИЭ, включая гидроэнергетику, являются быстрорастущими источниками самыми производства электроэнергии, увеличиваясь в среднем на 3.6 % в год. Причиной этому являются технологические многих усовершенствования И государственные стимулы BO странах, способствующие их более широкому использованию. Выработка электроэнергии из природного газа растет в среднем на 1.5 % в год, темпы роста атомной генерации составляют около 1.0 % в год. Величина электрической энергии, полученной от угля, остается относительно стабильной, но ее доля в общем производстве электроэнергии снизится с 35 % в 2018 году до 22 % к 2050 году по мере увеличения общего объема производства [4].

Ha рисунке 1.2 представлена диаграмма мирового производства электрической энергии генерирующими установками на базе ВИЭ [4]. Из рисунка ближайшей перспективе основной рост производства 1.2 В видно. ЧТО электроэнергии ВИЭ будет обеспечиваться за счет применения ветровых (ВЭС) и солнечных (СЭС) электростанций. По прогнозам EIA, к 2050 году объемы производства электроэнергии ВЭС и СЭС достигнут отметки в 6.7 и 8.3 триллиона киловатт-часов, соответственно, что составит более 70 % от общего объема производства электроэнергии ВИЭ [4].

По данным последнего отчета Международного агентства по возобновляемой энергии (IRENA) производство солнечной электроэнергии в мире в 2018 году варьируется от 110 до 120 ГВт·ч, а оценки на 2019 год находятся в диапазоне от 120 до 140 ГВт·ч (рис. 1.3). Значительная неопределенность этих данных обусловлена высокой конкуренцией на рынке, а также тем фактом, что одни компании сообщают данные о производстве, другие – о продажах, третьи – об отгрузках [5].



Рисунок 1.2. Мировое производство электроэнергии установками ВИЭ с прогнозом до 2050 года



Рисунок 1.3. Производство солнечной электроэнергии в мире

Важнейшими факторами, способствующими стремительному росту рынка солнечной энергетики, являются совершенствование технологий и снижение стоимости основных компонентов электростанций данного типа. По данным IRENA цены на фотоэлектрические модули с 2009 года снизились более чем

на 80%, а стоимость солнечной фотоэлектрической энергии снизилась на 73% за период с 2010 по 2017 год. С 2000 года производство солнечных фотоэлектрических устройств увеличивается с совокупными ежегодными темпами роста более 40 %.

После быстрого роста годового производства в Китае и Тайване с 2006 года, в 2014 году появилась новая тенденция – увеличение производственных мощностей в других азиатских странах, таких как Индия, Малайзия, Таиланд, Филиппины и Вьетнам, что обеспечивает развитие их экономик [5].

В связи с постоянным снижением цен на фотоэлектрические модули и ростом цен на электроэнергию, рынок солнечной генерации неуклонно растет. В 2018 году солнечная энергетика привлекла 58% всех новых инвестиций в ВИЭ или 140 млрд. долл. США [5].

Огромный потенциал и повсеместная доступность солнечной энергии определяют хорошие перспективы применения фотоэлектрических станций (ФЭС) в Российской Федерации (РФ), особенно в секторе микрогенерации, весомыми стимулами чему являются принятые меры государственной поддержки [6-8].

По оценкам Минэнерго РФ потенциал для малой генерации насчитывает около 100 тыс. небольших изолированных поселений по всей территории России, в том числе и в ряде районов Крайнего Севера и Дальнего Востока, где обеспечить централизованное энергоснабжение невозможно по техническим и экономическим Велик потенциал малой генерации объектах причинам. развития на инфраструктуры Северного морского пути, объектов Министерства обороны РФ, Министерства природных ресурсов и др. Это энергоснабжение метеорологических станций, маяков, военной техники, самолётов, судового оборудования, объектов сотовой связи, рыбацких хозяйств, кемпингов, разработки месторождений нефти и газа [9].

По данным Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ) около 65% территории России находится в зоне

изолированного (автономного) энергоснабжения и в основном обеспечиваются электроэнергией от дизельных электростанций (ДЭС), работающих на привозном топливе. Основной проблемой энергоснабжения изолированных северных территорий, где в настоящее время находятся в эксплуатации более 900 ДЭС с выработкой электроэнергии около 3000 млрд. кВт·ч/год, является низкая эффективность и надежность их работы из-за изношенности оборудования, при которой себестоимость производимой энергии находится в диапазоне 15 – 150 руб/кВт·ч [9].

Приоритетными достоинствами солнечной энергетики являются большой срок службы основного генерирующего оборудования (как правило, более 20 лет), ФЭС практически не требуют сервисного обслуживания, выпускаются на широкий диапазон мощностей и легко масштабируются, их можно максимально приблизить к изолированным объектам электроснабжения [10]. Данные преимущества определяют хорошие перспективы применения ФЭС в децентрализованных регионах в составе локальных изолированных энергетических систем (MicroGrid) и в секторе распределенной генерации.

Из представленной на рисунке 1.4 карты поступления солнечного излучения на территорию РФ видно, что районы Центральной и Восточной Сибири характеризуются относительно высокими значениями солнечной инсоляции от 4 до 4.5 кВт·ч/м<sup>2</sup> в сутки, тогда как на большей части Западных регионов России среднесуточные значения солнечной инсоляции составляют от 3 до 3.5 кВт·ч/м<sup>2</sup>.



Рисунок 1.4. Распределение среднесуточных значений солнечной радиации по территории России

Из представленной на рис. 1.4 карты хорошо видно, что во многих районах децентрализованного электроснабжения наблюдаются достаточно высокие значения солнечной инсоляции, в том числе и на обширной территории вокруг г.Якутска, на которой расположен крупнейший В России регион децентрализованного электроснабжения, обслуживаемый ОАО «Сахаэнерго». Это определяет хорошие коммерческие перспективы применения ФЭС в данных регионах, особенно в районах с высокой себестоимостью генерируемой электроэнергии.

Возможность успешного использования технологий солнечной энергетики в России подтверждается успешным опытом практического применения ФЭС и развития данной технологии, достигнутые в последнее время. За последние годы в России было установлено около 240 МВт фотоэлектрических генерирующих мощностей, а общая установленная мощность ФЭС с учетом Крымской солнечной электростанции в 2018 году превысила отметку 600 МВт [11]. Согласно

государственной стратегии развития возобновляемой энергетики [12], установленная мощность ФЭС в РФ к 2024 г. должна составить не менее 1.52 ГВт.

Лидером отрасли солнечной энергетики в России является компания «Хевел», которая уже построила 164 МВт СЭС на территории России и планирует до 2024 года ввести в эксплуатацию еще около 1 ГВт солнечной генерации. В 2017 году компания завершила модернизацию технологической линии и увеличила мощность производственного комплекса до 160 МВт в год, что позволит на 50% обеспечить текущие потребности российского рынка солнечной энергетики. Завод в Новочебоксарске начал выпуск солнечных модулей по гетероструктурной технологии с более высоким КПД ячеек. В 2017-2019 гг. «Хевел» планирует построить три СЭС общей мощностью 135 МВт в Астраханской области. Инвестиции составят более 15 млрд. рублей. В 2017 году «Хевел» совместно с Hyundai Corporation и АНО «Агентство Дальнего Востока по привлечению инвестиций и поддержке экспорта» объявили о реализации проекта стоимостью строительству гибридных около 8 млрд. руб. по солнечно-дизельных электростанций в Дальне-Восточном Федеральном округе общей мощностью 40 МВт. В ноябре 2017 года компания заключила соглашение с ПАО «Фортум» по продаже трёх солнечных электростанций общей установленной мощностью 35 МВт (Плешановская и Грачевская СЭС в Оренбургской области (по 10 МВт каждая), а так же Бугульчанская СЭС на 15 МВт в Республике Башкортостан.

Важным достоинством ФЭС является возможность построения на их основе эффективных систем автономного электроснабжения небольшой мощности. Малые автономные энергетические системы в последнее время находят все большее применение не только в районах, где питание потребителей от энергосистемы невозможно по объективным причинам, но и на территориях, имеющих развитую инфраструктуру и доступные возможности для подключения к центральной электрической сети. Основными причинами такого положения являются с одной стороны, постоянно растущие тарифы на электроэнергию, с другой все большая доступность и эффективность установок малой и возобновляемой энергетики.

Автономные системы электроснабжения обладают рядом несомненных достоинств:

- независимость от роста тарифов на электроэнергию;
- энергонезависимость от региональных энергосетей;
- отсутствие платы за подключение и затрат на строительство подводящей сети;
- независимость от масштабных энергетических кризисов.

Основным конкурентным преимуществом автономной энергетики является энергетическая безопасность, в связи с чем, она имеет хорошие перспективы развития, во многом обусловленные стабильным ростом энергопотребления.

По данным аналитической компании Navigant Research годовой объем рынка remote MicroGrid с ВИЭ в 2018 году составил 1231 МВт, а микросетей, связанных с «большой землей» (grid-tied microgrid) – 1463 МВт. Суммарный объем рынка в денежном выражении в 2018 году составил более 3 млрд. долларов США, к 2027 г прогнозируется рост рынка до 4230 МВт для изолированных MicroGrid и 11576 МВт для «сетевых», что потребует привлечения инвестиций на 30 млрд. долларов США.

По данным Международного агентства по возобновляемой энергии (IRENA) количество людей, обеспечиваемых электроэнергией от локальных изолированных энергетических систем, в период с 2011 по 2016 год выросло в шесть раз, достигнув более 133 миллиона человек [13], рисунок 1.5.



Рисунок 1.5. Численность населения, обеспечиваемого электроэнергией от локальных изолированных энергетических систем

Огромные размеры, низкая населения плотность И плохо развитая транспортная инфраструктура Восточных и Северных территорий России определяют хорошую перспективу применения ВИЭ для построения систем электроснабжения данных регионов. Надежное электроснабжение децентрализованных регионов является актуальной государственной задачей, что подтверждается целым рядом правовых и нормативных документов.

В президентском Указе «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» сформулирована задача развития распределённой генерации, в том числе на основе возобновляемых источников энергии, в первую очередь удалённых и изолированных энергорайонов [14].

В декабре 2018 года вице-премьер РФ Д. Козак поручил подготовить проект плана по модернизации неэффективной дизельной, мазутной и угольной генерации в труднодоступных регионах России [15].

Проведенный обзор текущего состояния и перспектив развития возобновляемой энергетики в России и мире показал, что несомненным лидером по динамике роста производства, финансовым вложениям, снижению стоимости оборудования и сферам практического применения является технология солнечной энергетики. Дальнейшее развитие данной технологии подкреплено нормативноправовыми и законодательными документами, данная технология востребована на рынке и обладает хорошим потенциалом коммерциализации.

# 1.2. Сравнительный анализ способов повышения эффективности фотоэлектрических станций

ФЭС Основными проблемами практического применения являются относительно невысокая эффективность преобразования первичной солнечной энергии, и ярко-выраженная зависимость энергетических характеристик солнечных батарей (СБ) от внешних климатических условий. Для устранения данных проблем во многих странах мира ведутся научно-исследовательские работы, направленные разработку новых совершенствование известных на И технических И технологических решений, обеспечивающих улучшение технико-экономических характеристик ФЭС. Полученные результаты исследований позволили значительно снизить стоимость производства фотоэлектрических преобразователей и повысить их КПД, а также разработать специализированные устройства, обеспечивающие повышение энергетической эффективности ФЭС: солнечные концентраторы, солнечные трекеры и контроллеры поиска максимальной мощности.

Солнечный концентратор – это специальное устройство, обеспечивающее фокусировку солнечного излучения на приемной поверхности. Преимущественной областью практического применения солнечных концентраторов является функцией Основной выработка тепловой энергии. тепловых солнечных концентраторов является нагрев материала-теплоносителя, который используется для отопления помещений и нужд горячего водоснабжения [16]. В зависимости от используемого метода концентрации солнечной энергии тепловые солнечные концентраторы подразделяются на параболоцилиндрические или параболические, а также гелиоцентрические установки башенного типа [16].

Для повышения эффективности фотоэлектрических преобразователей применяются оптические концентраторы солнечного света на основе линз Френеля, которые размещаются сверху солнечных батарей, рис. 1.6.



Рисунок 1.6. Фотоэлектрическая станция солнечными оптическими концентраторами энергии

Применение линзовых солнечных концентраторов обеспечивает значительное повышение концентрации (до восьми раз) светового потока, однако

это приводит к увеличению температуры СБ, что обуславливает необходимость применения определенных (более дорогих) типов фотоэлектрических модулей, а также организации их принудительной системы охлаждения. Относительно большие габариты и высокая стоимость оптических концентраторов значительно увеличивают материалоемкость и финансовые вложения в ФЭС, что ограничивает их практическое применение.

Солнечный трекер – это устройство, позволяющее следить за движением солнца по небосводу, и перемещать солнечную панель в положение, в котором поглощение солнечных лучей происходит наиболее эффективно. Опыт эксплуатации солнечных систем слежения в разных странах мира показал, что их применение обеспечивает повышение производительности ФЭС в среднем от 15 до 72 % в зависимости от типа трекера, географического положения электростанции, климатических условий и времени года [17, 19, 20]. На рисунке 1.7 представлена ФЭС с двухосевым солнечным трекером.



Рисунок 1.7. Солнечный трекер

Обязательными компонентами солнечных трекеров являются электрические приводы с редукторами, блоки управления и фотоэлектрические датчики, а также

различные механические устройства. Необходимость их применения значительно повышает стоимость ФЭС, а также ограничивает возможность их практического применения в районах с суровыми климатическими условиями. Кроме того, эффективность применения солнечных следящих систем сильно зависит от географической точки размещения ФЭС и 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 максимальной мощности (Maximum Power Point Tracking -MPPT), который обеспечивает автоматический поиск точки максимальной мощности (MPP) солнечных батарей в режиме реального времени.

Применение МРРТ контроллеров является целесообразным как в ФЭС с неподвижными СБ, так и оснащенных автоматическими следящими системами и солнечными концентраторами, что определяет наибольшую востребованность данного способа повышения эффективности фотоэлектрических станций.

Первые промышленные МРРТ контроллеры появились в конце 1980-х годов, в настоящее время на рынке представлено большое количество МРРТ контроллеров различных производителей, которые могут значительно различаться по целому ряду технических характеристик. Сравнительные технические характеристики нескольких МРРТ контроллеров представлены в таблице 1.1.

### Таблица 1.1. Основные технические характеристики солнечных МРРТ

Параметры/модель	ЕСО Энергия MPPT Pro 200/100	Victron BlueSolar Charge Controller MPPT 150/70	Morningstar TriStar MPPT 60A	Prosolar SunStar MPPT SS-50C
		Martin to the second seco		
Производитель	Россия, ООО "МикроАРТ"	Нидерланды, компания Victron Energy	CIIIA, Morningstar Corporation	Тайвань, компания Rich Electric
Тип используемых аккумуляторов	АКБ: GEL, AGM, LiFePO4	АКБ: GEL, AGM	АКБ: GEL, AGM	AKE: GEL, AGM
Напряжение батареи	12 /24/36/48/96 В автоматический выбор	12/24/36/48 В автоматический выбор	12/24/36/48 В автоматический выбор	12/24/36/48 В автоматический выбор
Максимальный ток заряда, А	100	70	60	50A
Максимальная мощность СБ	12B: 1350 Вт 24B: 2750 Вт 48B: 5500 Вт 96B: 11 кВт	12В: 1000 Вт 24В: 2000 Вт 36В: 3000 Вт 48В: 4000 Вт	12B: 800 BT 24B: 1600 BT 48B: 3200 BT	12В: 800 Вт 24В: 1600 Вт 48В: 3250 Вт
Максимальное напряжение СБ, В	200	150	150	140
Энергопотребление в режиме ожидания	Не более 1,9 Вт	12В: 0,55Вт 24В: 0,75Вт 36В: 0,9Вт 48В: 1,0Вт	1,3 - 4 Вт	2 Вт
КПД при полной нагрузке	12B: 95% 24B: 96,5% 36B: 97% 48B: 98%	12B: 95% 24B: 96,5% 36B: 97% 48B: 97,5%	н/д	н/д
Вес, кг	5	4,2	4,2	4,3
Размеры, мм	350 x 120 x 210	350 x 160 x 135	291 x 130 x 142	267,6 x 196 x 147

### контроллеров

Основными техническими характеристиками МРРТ контроллеров являются: номинальная мощность и диапазон напряжения СБ, тип используемых аккумуляторных батарей и алгоритм их заряда, коэффициент полезного действия преобразования энергии, эффективность отслеживания точки максимальной мощности, класс защиты, возможность управления внешними устройствами и мониторинга режимов работы, габариты и стоимость и т.д.

В большинстве современных МРРТ контроллеров применяется современная схемотехника с микропроцессорным управлением [21-22]. В зависимости от аппаратного исполнения различают два основных вида контроллеров МРРТ: аналоговые и цифровые. В аналоговых контроллерах управляющий сигнал формируется в виде опорного напряжения, которое сравнивается с выходным напряжением преобразователя, и далее сигнал рассогласования отрабатывается традиционной системой управления, построенной на базе пропорциональноинтегрального регулятора [23]. В цифровых контроллерах выходным сигналом является коэффициент заполнения d (duty cycle), который через генератор широтноимпульсной модуляции (PWM) подается непосредственно на транзисторные ключи преобразователя. Благодаря простоте реализации и более высокой надежности цифровые контроллеры МРРТ преимущественно применяются именно В современных ФЭС [24]. При использовании цифровых контроллеров величина d дискретно изменяется на величину  $\Delta d$  через определенное время выборки  $t_s$  (sample time), численные значения которых оказывают непосредственное влияние на точность и скорость отслеживания МРР при изменении освещенности и температуры СБ. Соответственно важнейшей задачей проектирования цифровых MPPT контроллеров является определение и выбор оптимальных значений  $\Delta d$  и  $t_s$ , обеспечивающих максимально эффективное использование доступной солнечной энергии.

Важнейшей характеристикой солнечных МРРТ контроллеров является используемый ими метод отслеживания точки максимальной мощности солнечных батарей. Именно метод отслеживания МРР во многом определяет эффективность самого контроллера и соответственно ФЭС. Практически все известные промышленные МРРТ контроллеры используют методы поиска МРР 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 МРР СБ, что подтверждает высокую актуальность данной проблемы для фотоэнергетики.

# 1.3. Обзор и сравнительный анализ методов отслеживания точки максимальной мощности солнечных батарей

## 1.3.1 Методы отслеживания точки максимальной мощности при равномерном освещении солнечных батарей

Основными компонентами любой фотоэлектрической станции являются: солнечная батарея (PV array), представляющая собой массив последовательно и параллельно соединенных фотоэлектрических модулей, преобразователь постоянного напряжения (DC-DC converter), контроллер поиска точки максимальной мощности (MPPT-контроллер) и электрическая нагрузка (Load).

Обобщенная структурная схема построения ФЭС представлена на рисунке 1.8. Источником питания ФЭС является СБ, которая обеспечивает преобразование непосредственное энергии солнечного излучения В DC-DC электроэнергию. Основным функциональным назначением преобразователя является преобразование изменяющегося в широких пределах выходного напряжения СБ к величине напряжения, определяемого требованиями нагрузки. Управление режимами работы DC-DC преобразователя обеспечивает МРРТ-контроллер, который по измеренным значениям выходного напряжения  $V_{PV}$  и тока  $I_{PV}$  солнечной батареи по заданной логике изменяет рабочий цикл преобразователя (*d*) таким образом, чтобы его выходная мощность соответствовала максимально возможной для данного эксплуатационного режима.



Рисунок 1.8. Обобщенная структурная схема построения ФЭС с МРРТконтроллером

Необходимость применения МРРТ-контроллера обусловлена тем, что энергетические характеристики солнечных батарей являются нелинейными и имеют ярко-выраженную зависимость от внешних климатических условий. В качестве примера на рисунке 1.9 представлено семейство вольт-амперных (BAX) и вольт-ваттных (BBX) характеристик фотоэлектрического модуля TP250MBZ [25] при различных значениях температуры (T) и освещенности (G).

Из рисунка 1.9 видно, что нелинейность ВАХ солнечных батарей определяет единственную для каждой из возможных комбинаций температуры и освещенности точку максимальной мощности (МРР), при которой все компоненты ФЭС могут работать с максимальной эффективностью. Так как освещенность и температура СБ

могут изменяться в процессе эксплуатации, MPPT-контроллер должен непрерывно отслеживать MPP и изменять рабочий цикл DC-DC преобразователя.



Рисунок 1.9. Расчетные вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики ФМ ТР250MBZ

К настоящему времени разработано большое количество методов поиска ТММ СБ, подробный обзор и сравнительный анализ которых представлен в [26].

Все известные методы поиска ТММ СБ можно разделить на две большие группы: классические и эволюционные.

Из классических методов поиска МРР наибольшее распространение получили метод возмущения и наблюдения (P&O) [27], метод возрастающей проводимости [28], метод постоянного напряжения (CV) [29] и некоторые другие [30]. Достоинствами классических методов являются простота аппаратной реализации и высокая эффективность при равномерном солнечном освещении.

Одним из самых простых методов поиска МРР СБ является метод постоянного напряжения (Constant Voltage). В данном методе для управления преобразователем используется сигнал рассогласования между текущим значением напряжения СБ  $V_{PV}$  и фиксированным опорным напряжением  $V_{REF}$ , величина которого принимается равным напряжению в ТММ  $V_{MPP}$  используемых ФМ. Конкретные численные значения  $V_{REF}$  определяются по данным технической спецификации используемых ФМ, и конфигурации СБ. Метод СV основан на предположении, что изменения освещенности и температуры СБ в процессе эксплуатации незначительны, и постоянное опорное напряжение обеспечивает хорошее приближение к реальному напряжению в МРР.

Блок-схема алгоритма CV представлена на рисунке 1.10.



Рис.1.10. Блок-схема алгоритма метода постоянного напряжения (CV)

Достоинствами метода CV являются использование только одного датчика напряжения и его эффективная работа в условиях низкой освещенности (на пологих ВАХ), благодаря чему его часто используют совместно с поисковыми алгоритмами. Однако анализ ВАХ фотоэлектрических модулей показывает, что если влияние уровня освещенности на величину  $V_{\rm MPP}$  незначительно, то изменения температуры приводят к ее заметному смещению, обуславливая невысокую эффективность метода в условиях значительных колебаний температуры, особенно характерной для высоких северных широт [26].

Методы случайных возмущений (P&O) и приращения проводимости (IC) относятся к группе поисковых алгоритмов, основными достоинствами которых являются независимость от технических характеристик, используемых ФМ, и более высокая точность отслеживания MPP.

Идея алгоритма метода случайных возмущений (P&O) заключается в поиске MPP за счет дискретного изменения рабочего цикла DC-DC преобразователя на каждой итерации k на величину  $\Delta d$ . Численные значения  $\Delta d$  выбираются на основе компромисса между необходимой точностью и скоростью отслеживания MPP (при малых значениях  $\Delta d$  выше точность, но ниже скорость). Для обеспечения работы алгоритма P&O необходимы два датчика, которые используются для измерения текущих значений выходного напряжения V(k) и тока I(k) солнечной батареи, по значениям которых вычисляется ее выходная мощность P(k). Работа алгоритма P&O реализуется на основе следующих математических выражений:

$$d_{k+1} = d_k + \Delta d, \quad \text{if}(P_k > P_{k-1}) \\ d_{k+1} = d_k - \Delta d, \quad \text{if}(P_k < P_{k-1})$$
(1.1)

Блок схема алгоритма Р&О представлена на рис 1.11, а логику его работы поясняет рисунок 1.12, на котором показаны направления поиска MPP.



Рисунок 1.11. Блок-схема алгоритма метода случайных возмущений (Р&О)



Рисунок 1.12. Принцип действия и логика работы алгоритма Р&О

Благодаря простоте реализации данный алгоритм получил наибольшее распространение в промышленных МРРТ контроллерах. К недостаткам алгоритма следует отнести постоянные колебания вокруг МРР, а также возможные ошибочные результаты в определении МРР при резком изменении уровня освещенности.

Идея метода приращения проводимости (IC) основана на равенстве мгновенной проводимости СБ и производной проводимости в точке максимальной мощности [26].

Математические соотношения, поясняющие работу алгоритма IC можно легко получить, продифференцировав мощность P солнечной батареи по напряжению V с учетом того, что производная в точке максимальной мощности обращается в нуль:

$$dP/dV = d(V \cdot I)/dV = I + V(dI/dV) = 0$$
(1.2)

Уравнение (1.2) можно представить в виде

$$dI / dV = -I / V \tag{1.3}$$

Из выражения (1.3) вытекают два важных соотношения, которые позволяют определить положение рабочей точки СБ на ее ВВХ относительно точки максимальной мощности:

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \left(\frac{dP}{dV} > 0\right) - \text{ рабочая точка слева от MPP;}$$

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \left(\frac{dP}{dV} > 0\right) - \text{ рабочая точка справа от MPP.}$$
(1.4)

С учетом соотношений (1.4) работа алгоритма IC может быть представлена в виде блок-схемы, изображенной на рис. 1.13.



Рисунок 1.13. Блок-схема алгоритма приращения проводимости

Логику работы алгоритма IC поясняет рисунок 1.14, на котором показаны необходимые направления изменения величины рабочего напряжения CE для перемещения в сторону MPP.

Алгоритм IC обеспечивает более быстрое отслеживание и более устойчивую работу в МРР в сравнении с алгоритмом Р&О, однако сложность вычислений возрастает.



Рисунок 1.14. Принцип действия и логика работы алгоритма ІС

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 (PSC), вызванных налетевшим облаком, тенью от деревьев и близлежащих зданий, загрязнением поверхности и т.п. Потери мощности ФЭС изза частичного затенения и неточного отслеживания максимальной мощности необычайно велики и могут составлять до 70% от общей вырабатываемой мощности. Следовательно, надежное и точное отслеживание МРР при частичном затенении СБ является необходимым условием обеспечения высокой энергетической эффективности ФЭС [31-33].

## 1.3.2 Методы отслеживания точки максимальной мощности при частичном затенении солнечных батарей

Частичное затенение оказывает существенное влияние на выходную мощность СБ. В условиях частичного затенения (partial shading conditions – PSC) на часть элементов фотоэлектрической панели поступают меньшие значения
солнечной радиации: затененные элементы (shaded PV cell), в то время как другая часть солнечной батареи оказывается более освещенной: освещенные фотоэлементы (unshaded PV cell). Из-за различия ВАХ солнечных элементов (рисунок 1.15) величина тока, генерируемого освещенными фотоэлементами, оказывается выше, чем ток, создаваемый затемненными элементами. Это несоответствие приводит к обратному смещению напряжения (bias voltage) на затененном фотоэлементе и рассеиванию на нем энергии, обуславливая проблему «эффекта горячего пятна», которая является причиной необратимого повреждения солнечной батареи [34].



Рисунок 1.15. Вольт-амперные характеристики нормально освещенного и затененного солнечного элементов

Для устранения данной проблемы используют байпасные диоды (by-pass diode), которые подключают параллельно к части фотоэлементов солнечной батареи [34]. При равномерном освещении и одинаковой температуре фотоэлементов байпасный диод будет закрыт, но в режиме PSC он перейдет в режим прямой проводимости, обеспечивая протекание тока СБ через него, а не через затененный фотоэлемент.

Байпасный диод выполняет две основные важные функции [35-38], которые заключаются в следующем:

- защита фотоэлектрического модуля от проблем с горячими точками и возможных тепловых пробоев;
- уменьшение падения напряжения на затененных элементах до значений 0.4–
   0.7 В, соответствующих величине прямого падения напряжения на диоде.

Применение байпасных диодов позволяет решить проблему локального перегрева и сохранения срока службы СБ в условиях частичного затенения [39, 40], однако они не обеспечивают отбора с СБ максимальной доступной мощности.

В качестве примера выполним анализ режимов работы СБ в условиях неравномерного освещения, состоящую из трех секций, соединенных в последовательную цепочку, рис.1.16. Каждая секция СБ состоит из 7 последовательно соединенных ФМ ВР 365 65W.

Расчетные вольт-амперные (ВАХ) и вольт-ваттные характеристики (ВВХ) СБ при различных условиях освещения представлены на рисунке 1.17. Из рис.1.17 видно, что в условиях частичного затенения СБ на ВВХ имеются несколько локальных экстремумов, один из которых является глобальным [23].

При частичном затенении солнечной батареи ее вольт-ваттная характеристика приобретает сложную форму с несколькими искажается и локальными экстремумами, что значительно усложняет задачу определения глобальной точки максимальной мощности солнечной батареи. Стандартные методы поиска точки максимальной мощности, которые применяются В контроллерах фотоэлектрических станций, не обеспечивают надежного отслеживания глобального экстремума вольт-ваттной характеристики, что приводит К увеличению потерь и снижению производительности электростанции.



Рисунок 1.16. Возможные варианты неравномерного освещения солнечной

батареи



Рисунок 1.17. а – вольт-ваттные и ; б – вольт-амперные характеристики СБ в условиях частичного затенения

В последние годы активно разрабатываются эволюционные методы поиска МРР СБ, обеспечивающие надежное определение точки глобального экстремума в условиях, когда их BBX имеет многоэкстремальную форму [41]. Эволюционные методы поиска МРР строятся на базе генетических алгоритмов (GA) [43,44], методах искусственного интеллекта с применением нечеткой логики (FL) и нейронных сетей (ANN) [45,46]. Подробный обзор, классификация и сравнительный анализ методов МРРТ приведен в работах [28,30,41,42,47]. В качестве критериев сравнительной оценки эффективности методов МРРТ используют простоту аппаратной реализации, стоимость, скорость и точность отслеживания МРР в различных условиях эксплуатации ФЭС.

Огромное количество научных работ, посвященных данной тематике исследований, и опубликованных в последние годы, свидетельствуют о том, что научная проблема разработки эффективных алгоритмов и МРРТ контроллеров ФЭС, обеспечивающих надежное, быстрое и точное отслеживание МРР в условиях частичного затенения СБ, не имеет на сегодняшний день законченного решения.

## 1.4. Применение эволюционных алгоритмов для отслеживания точки максимальной мощности солнечных батарей

1.4.1 Обзор эволюционных алгоритмов и областей их практического применения

Общий принцип функционирования эволюционных алгоритмов состоит в направленной эволюции возможных решений оптимизационной задачи путем внесения случайных изменений и рекомбинации хороших решений с целью получить лучшие [83].

Эволюционные алгоритмы наиболее перспективны для решения задач оптимизации, которые не имеют точного аналитического решения, но при этом

40

необходимо найти наилучшее решение, удовлетворяющее определенным критериям.

В настоящее время эволюционные алгоритмы используются для решения самых разнообразных задач: дизайн космических аппаратов, настройка ПИД регуляторов, разработка электронных схем, двигателей самолетов и антибиотиков, синтез конечных автоматов, конструирование роботов, настройка и обучение искусственной нейронной сети и т.д. Эволюционные алгоритмы используют для решения технических и технологических задач многие известные компании, например: NASA, Boeing, General Motors, Honda, Yamaha, General Electric, Yandex , Hewlett-Packard, Proctor&Gamble, Coca Cola и др. [83].

Эволюционные алгоритмы часто используют для решения нелинейных многокритериальных оптимизационных задач, в том числе и в электроэнергетике [48,49]. Наибольшее распространение получили алгоритмы роя частиц (PSO), поиска кукушки (CS), колоний муравьев (ACO), пчелиных семей (ABC), генетический алгоритм (GA) и алгоритм летучих мышей (Bat) [48,49].

В энергетике алгоритм PSO используется для решения задач управления режимами сложных взаимосвязанных интеллектуальных энергосистем, оптимального выбора емкости и конфигурации накопителей энергии, эффективной скоординированной коммутации и совместном использовании энергии гибридных микросистем с накопителями энергии [50-55].

Алгоритм поиска кукушки используется для решения задач оптимальной конфигурации и управления режимами энергопотребления изолированных энергетических систем, проектировании гибридных энергетических комплексов с ВИЭ и нелинейных взаимосвязанных энергосистем [56-58].

Достоинствами алгоритмов роя частиц (PSO) и поиска кукушки (CS), в сравнении с другими типами эволюционных алгоритмов, являются простота, универсальность и высокое быстродействие [10,59-61,43,62,63], благодаря чему

они имеют хорошие перспективы применения в МРРТ контроллерах для отслеживания глобальной точки максимальной мощности солнечных батарей в условиях частичного затенения.

#### 1.4.2 Описание алгоритма роя частиц.

Алгоритм роя частиц (PSO) был разработан Джеймсом Кеннеди и Расселом Эберхартом в 1995 году [64]. Он представляет собой метод оптимизации нелинейных функций, и основан на поведении стай птиц. Идея алгоритма заключается в непрерывном перемещении частиц в возможном пространстве решений, при этом текущее состояние частицы характеризуется двумя переменными: координатой  $x_i^k$  и скоростью перемещения  $v_i^k$ . Соответственно в *n*-мерном пространстве решений состояние каждой *i*-ой частицы на *k*-ом итерационном шаге расчета определяется векторами  $X_i^k = [x_i^1, x_i^2, ...., x_i^{k_{max}}]$  и  $V_i^k = [v_i^1, v_i^2, ...., v_i^{k_{max}}]$ . В начале поиска координаты частиц случайным образом разбросаны по всей возможной области решений, при этом каждая частица имеет случайный вектор скорости. В процессе расчета направление и вектор скорости каждой из частиц изменяются в соответствие со сведениями о найденных на предыдущей итерации оптимумах.

В процессе поиска в каждой точке, где побывала частица, рассчитывается значение целевой функции  $p_i^k$ . Из вектора значений целевой функции в точках, где побывала частица  $P_i^k = [p_i^1, p_i^2, ...., p_i^{k_{max}}]$  выбирается лучшее значение, которому присваивается индекс *Ppbest<sub>i</sub>*. После этого выбирается лучшее из решений, пройденных всеми частицами *Pgbest*, что имитирует мгновенный обмен информацией между частицами (Рисунок 1. 18).



Рисунок 1.18. Движение частиц в PSO

В практических приложениях большее распространение получил модифицированный PSO, предложенный Юхи Ши и Расселом Эберхартом в 1998 году [65], в котором в отличие от классического алгоритма используется дополнительный коэффициент инерции *w*, который определяет градиент изменения скорости частиц. Блок-схема классического PSO представлена на рисунке 1.19.

Модифицированный PSO описывается следующей системой уравнений:

$$v_{i}^{k+1} = v_{i}^{k} \cdot w + c_{1} \cdot r_{1} \cdot \left[ Ppbest_{i} - x_{i}^{k} \right] + c_{2} \cdot r_{2} \cdot \left[ Pgbest - x_{i}^{k} \right], \qquad (1.5)$$
$$x_{i}^{k+1} = x_{i}^{k} + v_{i}^{k}; \qquad i = 1, 2, ..., N; \qquad k = 1, 2, ..., k_{max}$$

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;  $k_{\text{max}}$  – максимальное число итераций.



Рисунок 1.19. Блок-схема классического PSO

При применении PSO в контроллерах МРРТ 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,  $c_1$ ,  $c_2$  оказывают непосредственное влияние на его характеристики, и для достижения максимальной эффективности алгоритма необходимо найти лучшую комбинацию параметров. С учетом того, что возможно применение не только различных численных значений параметров, но и разнообразных законов их изменения, поиск лучшей комбинации требует проведения огромного количества экспериментов, представляет собой И трудноразрешимую задачу. Свидетельством того, что данная задача не имеет на сегодняшний день окончательного решения подтверждают результаты исследований, в которых предлагаются различные численные значения параметров PSO и законы их изменения [61,66-68].

На основе предварительного анализа и обобщения результатов проведенных исследований, посвященных применению PSO в MPPT контроллерах, в данной работе в качестве объекта анализа выбраны две модифицированные версии PSO, показавших высокую эффективность при отслеживании MPP СБ [61,69,70].

Одной из таких модификаций является PSO с переменными значениями коэффициентов инерции и ускорения (VCPSO), предложенный авторами работы [61].

Авторы [61] предлагают использовать VCPSO с линейным законом изменения коэффициента инерции

$$w^{k} = w_{\max} - \frac{k}{k_{\max}} \cdot \left( w_{\max} - w_{\min} \right), \qquad (1.6)$$

в диапазоне от *w*<sub>max</sub>=1.0 до *w*<sub>min</sub>=0.1 и линейные разнонаправленные законы изменения коэффициентов ускорения

$$c_{1}^{k} = c_{1\max} - \frac{k}{k_{\max}} \cdot (c_{1\max} - c_{1\min}), \quad c_{2}^{k} = c_{2\min} + \frac{k}{k_{\max}} \cdot (c_{2\max} - c_{2\min}) \quad (1.7)$$

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 теоретических [61] и экспериментальных [69] исследований показали, что VCPSO с данными параметрами обеспечивает эффективное отслеживание МРР СБ, состоящей из трех последовательно соединенных ФМ.

Другой модификацией PSO, имеющей хорошие перспективы для применения в контроллерах MPPT, является версия алгоритма, предложенная Марисом Клером (Maurice Clerc) и Джеймсом Кеннеди в 2002 году [71]. В данной модифицированной версии (CFPSO) сходимость алгоритма обеспечивается за счет использования специального коэффициента сужения *CF*, численные значения которого определяются по уравнению:

$$CF = \frac{2}{\left|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4 \cdot \varphi}\right|}, \quad \text{where} \quad \varphi = c_1 + c_2, \quad \varphi > 4 \tag{1.8}$$

Новые координаты частицы (применительно к МРРТ-контроллеру значения коэффициента заполнения *d*) на каждой итерации алгоритма вычисляются по уравнению:

$$d_i^{k+1} = d_i^k + CF \cdot \left[\Delta d_i^k + c_1 \cdot r_1 \cdot \left(Ppbest_i - d_i^k\right) + c_2 \cdot r_2 \cdot \left(Pgbest - d_i^k\right)\right]$$
(1.9)

Применение CFPSO гарантирует сходимость алгоритма при любых значениях  $c_1$  и  $c_2$ , что значительно упрощает задачу определения их оптимальных значений. Результаты работы [70] подтверждают возможность применения CFPSO для отслеживания МРР СБ. Предварительно проведенные исследования показали, что наибольшая эффективность CFPSO наблюдается при следующих численных значениях  $c_1=c_2=2.5$ , что соответствует величине *CF*=0.382.

Блок схема модифицированного PSO представлена на Рисунке 1.20. После исполнения алгоритмом полного цикла итераций  $k_{\text{max}}$  выполняется проверка условия перезапуска алгоритма. Критерием для перезапуска PSO является изменение выходной электрической мощности СБ на величину больше установленного предельного значения:

$$\varepsilon = \frac{P_{\rm PV}^{\ k_{\rm max}} - P_{\rm PV}^{\ k_{\rm max}-1}}{P_{\rm PV}^{\ k_{\rm max}-1}} \cdot 100 > \Delta P_{\rm PVmax}, \,(\%)$$
(1.10)

где  $\Delta P_{PVmax}$  – заданное предельное значение изменения мощности СБ за время  $t_s$ . В настоящих исследованиях величина  $\Delta P_{PVmax}$  принята равной 5%, что обеспечивает хороший компромисс между полученной и потерянной энергией за счет отслеживания ТММ.



Рисунок 1.20. Блок-схема модифицированного алгоритма роя частиц

Отличительной особенностью используемого в данной работе алгоритма в сравнении со стандартными алгоритмами PSO является применение сортировки частиц. Сортировка частиц по величине текущих значений  $d_i^k$  производится перед выполнением каждой последующей итерации алгоритма и обеспечивает уменьшение пульсаций выходной мощности СБ, а соответственно и потерь энергии в процессе поиска MPP.

#### 1.4.3 Описание алгоритма поиска кукушки

Алгоритм поиска кукушки (Cuckoo Search – CS) был разработан Янгом Синьшэ (Xin-She Yang) и Суашем Дебом (Suash Deb) в 2009 году [72]. Алгоритм работает на основе случайного поиска, который имитирует стратегию воспроизводства кукушек. Основной идеей для разработки авторами нового алгоритма послужил гнездовой паразитизм некоторых видов кукушек, которые подкладывают свои яйца в гнезда других птиц.

Следует отметить, что в природе некоторые из видов птиц вступают в прямой конфликт с кукушками, которые подкладывают свои яйца в их гнезда. Если хозяин гнезда обнаруживает в своем гнезде яйца кукушек, он будет бросать эти чужеродные яйца прочь, или покидает свое гнездо и строит новое в другом месте.

Поиск подходящего хозяина птичьего гнезда является важной частью стратегии воспроизводства кукушки. Как правило, поиск гнезда похож на поиск пищи, которая происходит в случайной или квази случайной форме. В целом, в поисках пищи, животные выбирают направление или траекторию, которые могут быть смоделированы с помощью определенных математических функций.

Одной из наиболее распространенных моделей поведения многих животных и насекомых является полет Леви. Недавнее исследование, проведенное Рейнольдсои и Фраем [73] показало, что полет Леви можно рассматривать как случайную прогулку, где размер шага имеет распределение вероятностей Леви. В алгоритме CS поиск кукушкой нового гнезда характеризуется Lévy полетом.

Математически полет Леви является случайным перемещением в пространстве с размерами шагов, которые извлекаются из распределения Lévy по степенному закону, как показано ниже [74]:

$$y = L^{-\lambda} \tag{1.11}$$

где L – длина полета, а  $\lambda$  является дисперсией. Так как 1 < $\lambda$  <3, *у* имеет бесконечную дисперсию. Пример выполнения кукушкой полета Леви в двумерном пространстве решений представлен на рис. 1.21.



Рисунок 1.21. Пример выполнения кукушкой полета Леви в двумерном пространстве решений

Классический стандартный алгоритм CS построен на трех идеализированных правилах:

- 1. Каждая кукушка откладывает одно яйцо за раз, и помещает его в случайно выбранном гнезде;
- Лучшие гнезда с самым высоким качеством яиц (пригодными решениями) переносятся на следующее поколение;
- Количество доступных гнезд фиксировано, и хозяин гнезда может обнаружить яйцо кукушки с вероятностью 0 < p<sub>a</sub> <1. Обнаруженные гнезда (решения) исключаются из дальнейшего рассмотрения.

При создании нового решения для кукушки *i*, полеты Леви выполняются в соответствии со следующим математическим выражением:

$$x_i^{(t+1)} = x_i^t + \alpha \oplus L\acute{e}vy(\lambda)$$
(1.12)

где *\alpha* – размер шага, который связан с масштабами задачи.

В большинстве случаев, можно использовать  $\alpha = 1$ , тогда в уравнении (1.12)  $L\acute{evy}(\lambda)$  - случайная величина, k – номер итерации, знак  $\oplus$  представляет собой знак поэлементного умножения.

Для задач с переменным значением размера шага, величина *α* определяется по уравнению:

$$\alpha = \alpha_0 (x_i^{(k)} - x_i^{(k)}) \tag{1.13}$$

Случайная длина шага полёта Леви представляется случайным блужданием, которое выводится из распределения Леви:

$$L\acute{e}vy(\lambda) \approx u = L^{-\lambda}, \quad 1 \le \lambda \le 3$$
(1.14)

Применительно к МРРТ контроллеру координаты лучшего из гнезд соответствуют величине рабочего цикла DC-DC преобразователя *d*, при которой выходная электрическая мощность СБ *P*<sub>PV</sub> принимает максимальное значение.

Новые координаты гнезд для всех кукушек на каждой итерации алгоритма вычисляются по уравнению [74]:

$$\begin{aligned} d_i^{(k+1)} &= d_{best}^{k} + \alpha \oplus L\acute{e}vy(\lambda)\beta k, \\ \alpha &= \alpha_0 (d_j^{(k)} - d_i^{(k)}), \quad d_i = d_1, d_2, \dots, n \end{aligned}$$
(1.15)

Упрощенная схема распределения Леви может быть записана в следующем виде:

$$s = \alpha_0 (d_{best} - d_i) \oplus L\acute{e}vy(\lambda) \approx k \times (\frac{u}{(|v|^{\frac{1}{\beta}})})(d_{best} - d_i), \qquad (1.16)$$

где *β* = 1.5, а *k* является коэффициентом умножения Леви (выбранный дизайнером), в то время как *u* и *v* определяются из типичных кривых распределения. Блок-схема алгоритма CS представлена на рис. 1.22.



Рисунок 1.22. Блок-схема работы алгоритма CS

В качестве критериев остановки итерационного процесса вычислений используются максимальное число итераций и относительная погрешность вычисления глобального экстремума целевой функции:

$$\varepsilon = \frac{g_{best}^{k} - g_{best}^{k-1}}{g_{best}^{k-1}} \cdot 100 < 0,3 \tag{1.17}$$

В стандартном алгоритме CS вероятность  $p_a$  и параметры полёта Леви (a, L и  $\lambda$ ) являются константами. Однако, предлагаются и улучшенные алгоритмы CS, в которых используются динамические значения этих параметров.

Например, большие значения величин  $p_a$  и *а* на начальных итерациях обеспечивают более тщательное сканирование пространства возможных решений задачи, а их меньшие значения обеспечивают повышение точности и улучшение сходимости алгоритма.

Актуальной проблемой практического применения алгоритма CS является определение его параметров, наилучшим образом отвечающих условиям и требованиям решаемой конкретной технической задачи.

## 1.4.4 Проблемы применения эволюционных алгоритмов в контроллерах максимальной мощности

Выполненный работ, посвященных анализ научных исследованиям контроллеров МРРТ ФЭС, построенных на базе PSO и CS, показал, что многие исследователи производят выбор основных параметров PSO (число частиц роя N, коэффициент инерции w, коэффициенты ускорения  $c_1$  и  $c_2$ , время выборки  $t_s$ ) методом проб и ошибок без учета топологии и параметров DC-преобразователя и конфигурации СБ. При этом полученные авторами рекомендации по выбору параметров PSO зачастую имеют противоречивый характер. Например, авторы работ [68,75-79] предлагают строить PSO на базе 3 частиц, авторы работ [59,60] на базе 4, в работах [61,69] используются 5 частиц, в работе [67] – 6, в работе [80] предлагается использовать 9 частиц, в [81] – 10 частиц. В работах [76-79,80,81] применяются неизменные значения коэффициентов ускорения, в работах [67,68]

предлагается использовать убывающие законы для  $c_1$  и  $c_2$ , в работах [61,66,69] – убывающий закон для  $c_1$  и возрастающий для  $c_2$ . В значительной мере различаются мнения авторов и по выбору рациональных значений  $t_s$ : в работах [60,77,79] величина  $t_s$  составляет менее 0,01 с, в работе [78] – 0,06 с, в работах [68,76]  $t_s = 0,1$  с, в работах [61,67,69,75]  $t_s = 0,2$  с.

При применении алгоритма CS существуют существенные различия во мнении авторов при определении значения времени выборки  $t_s$ : в работах [82]  $t_s = 0.1$  с, в работах [43]  $t_s = 0.01$  с.

Очевидно, что 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 CБ, подключенной к повышающему преобразователю с резистивной нагрузкой. Соответственно, полученные результаты исследований не могут быть использованы при проектировании автономных ФЭС малой мощности, схемы построения которых преимущественно строятся на базе преобразователей понижающего типа (buck converter), работающих на аккумуляторную батарею (АБ).

Выбор параметров основных элементов ФЭС производится на стадии проектирования и определяется характеристиками энергопотребления объекта электроснабжения, географическим местом размещения электростанции, требованиями к надежности электроснабжения потребителей и т.п. При этом элементы ФЭС являются взаимосвязанными компонентами, оказывающими непосредственное взаимное влияние, и соответственно выбор параметров каждого отдельного элемента системы должен производиться с учетом характеристик всех остальных элементов ФЭС. Проведенный обзор научных публикаций по теме исследования показал, что в настоящее время отсутствуют методики по выбору оптимальных параметров PSO и CS, что является сдерживающим фактором для практического применения данных алгоритмов.

# 1.5. Обзор и сравнительный анализ методов оптимизации состава оборудования гибридных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии

Приоритетным направлением развития современной энергетики является активное внедрение экологически чистых технологий производства электрической технологий являются энергии. Одной таких гибридные ИЗ системы электроснабжения с ВИЭ. Наиболее перспективной областью практического применения HRES являются системы электроснабжения потребителей небольшой мощности. территориально расположенные В труднодоступных районах. удаленных от центральной электрической сети [84]. По оценкам Минэнерго РФ потенциал для малой генерации насчитывает около 100 тыс. небольших изолированных поселений по всей территории России, в том числе в ряде районов Крайнего Севера и Дальнего Востока, где обеспечить централизованное энергоснабжение невозможно по техническим и экономическим причинам [85].

Важной задачей проектирования HRES является выбор состава основного генерирующего оборудования, обеспечивающего оптимальные техникоэкономические показатели проектируемой энергетической системы. Высокая сложность решения данной задачи обусловлена стохастическим характером генерации и нелинейностью характеристик энергетических установок на основе ВИЭ. В общем случае в составе HRES могут использоваться разные типы генерирующих источников, но преимущественно применяются: фотоэлектрические (ФЭУ) и ветроэнергетические (ВЭУ) установки, накопители энергии на основе АБ и/или топливных элементов (ТЭ), а в качестве гарантированного источника питания дизель-генераторные установки (ДГ).

Решению задач оптимизации состава оборудования HRES в последнее время посвящено большое количество научных работ, авторы которых используют разнообразные критерии и алгоритмы оптимизации. В качестве технических критериев чаще всего используются: вероятность потери питания (loss of power supply probability – LPSP), вероятность потери нагрузки (loss of load probability – LLS), недоотпуск электроэнергии потребителю (expected energy not supplied – EENS). В качестве экономических критериев наибольшее распространение получили: стоимость жизненного цикла (life cycle cost – LCC), выровненная стоимость электроэнергии (levelized cost of energy – LCOE), чистая текущая стоимость (net present cost – NPC). В большинстве случаев технические критерии ограничений используются В качестве ПО надежности проектируемых энергетических систем, а экономические критерии применяются в качестве критериев целевой функции оптимизации. Например, авторы работ [86,87] используют LPSP и LCC критерии для оптимизации состава оборудования ФЭУ/ВЭУ/АБ систем, предназначенных для электроснабжения автономных потребителей в отдаленных районах Ирана. LPSP и NPC критерии используются для оптимизации ФЭУ/ВЭУ/ТЭ системы, расположенной в юго-восточном регионе Мексики [88]. Экономические критерии LCOE и NPC используются авторами для выбора оптимального состава оборудования ФЭУ/ВЭУ/АБ/ДГ систем для электрификации сельских поселений в трех автономных округах Колумбии [89] и деревни в Бенине (Африка) [90]. Для оптимизации состава оборудования ФЭУ/ВЭУ/АБ системы в районе Альмора (Индия) авторы применяют LLS и EENS критерии [91], в работе [92] выбор состава оборудования ФЭУ/ВЭУ системы с гидроаккумулирующей электростанцией в провинции Сычуань (Китай) выполнен с помощью LCOE и LPSP критериев. Эти же критерии использовалось для оптимизации ФЭУ/ВЭУ/АБ/ТЭ системы в районе города Шираз на юге Ирана [93], критерий LCC используется для оптимизации ФЭУ/ВЭУ/ТЭ/ДГ системы в районе

города Рафсанджан (Иран) [94]. Для оптимизации состава оборудования ФЭУ/ВЭУ/АБ/ДГ системы в районе города Дахран (Саудовская Аравия) авторы используют LCC критерий совместно с EENS критерием [95]. Для повышения достоверности полученных результатов некоторые авторы применяют многоцелевую оптимизацию, используя в качестве дополнительных критериев экологические и социально-политические факторы: выбросы CO2, площадь отчуждения земли, уровень автономности, стоимость топлива и т.п. [96-99].

Большим разнообразием характеризуются и применяемые алгоритмы оптимизации состава оборудования ГСЭС, подробный обзор которых приведен в работах [100, 101]. В последние годы для оптимизации HRES все чаще применяются эволюционные алгоритмы, из которых наибольшее распространение получили генетические алгоритмы [88, 93, 102], алгоритм поиска кукушки [91, 102] и алгоритм роя частиц (particle swarm optimization – PSO) [86, 92, 97, 98]. Применяются также сравнительно новые виды эволюционных алгоритмов, например: имитации отжига [94], молниеносного поиска [95], преподавания и обучения [96], и другие [87].

Упростить решение задачи оптимизации состава оборудования HRES позволяет применение специализированного программного обеспечения, из которого наиболее распространенными являются программные комплексы HOMER, HOGA, HYBRID2 и некоторые другие [100]. Программные комплексы позволяют выполнить сравнительный анализ HRES различных конфигураций, содержат обширную базу технико-экономически алгоритмы оптимизации. Подробный обзор прикладного программного обеспечения для моделирования режимов и оптимизации состава оборудования HRES рассмотрен в работе [103], примеры практического применения программных комплексов для оптимизации HRES различных конфигураций приведены в работах [89, 90, 100]. Следует отметить, что практическое применение данных программных продуктов в России

56

ограничивается тем, что большинство из них являются коммерческими и плохо адаптированными к вводу исходных данных временных рядов скоростей ветра и солнечной радиации для большинства регионов России, обусловленную скудной сетью метеостанций на территории нашей страны [104].

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

Цель исследований состояла в разработке методики и программного приложения для оптимизации состава оборудования HRES, обеспечивающей ее практическое применение при проектировании изолированных электроэнергетических систем, территориально расположенных в любом регионе России.

#### 1.6. Выводы по разделу

Проведенный обзор текущего состояния рынка возобновляемой энергетики показал, что наилучшие перспективы практического применения в России и мире имеют фотоэлектрические станции, особенно в секторе микрогенерации.

Одним из наиболее эффективных, и в тоже время менее затратных, способов повышения энергетической эффективности ФЭС является реализация режима отбора максимальной мощности солнечной батареи при изменении ее освещенности и температуры.

Применяемые в настоящее время в промышленных контроллерах ФЭС методы отслеживания точки максимальной мощности не обеспечивают ее надежное, быстрое и точное определение в условиях частичного затенения солнечных батарей, что приводит к существенному снижению эффективности использования солнечной энергии.

Проведенный сравнительный анализ методов отслеживания точки максимальной мощности СБ в условиях частичного затенения показал, что наиболее эффективными методами являются эволюционные алгоритмы роя частиц и поиска кукушки, достоинствами которых являются простота, универсальность и высокое быстродействие. Обзор научных публикаций по теме исследования показал, что в настоящее время отсутствуют обоснованные методики по выбору оптимальных параметров эволюционных алгоритмов И преобразователей напряжения контроллеров максимальной мощности фотоэлектрических станций, что является сдерживающим фактором для их практического применения.

Для обоснованного выбора параметров основных компонентов ФЭС, синтеза и сравнительной оценки эффективности алгоритмов МРРТ контроллеров, необходимы всесторонние исследования динамических режимов работы ФЭС в реальных условиях эксплуатации, что определяет необходимость разработки имитационной математической модели фотоэлектрической станции. Нелинейность характеристик основных компонентов ФЭС, а также их ярко-выраженная зависимость от внешних факторов, многие из которых имеют стохастическую природу, вызывает необходимость применения численных математических методов, которые хорошо реализованы в программном комплексе MatLab/Simulink, что и предопределило его выбор в качестве основного инструмента исследований.

Проведенный обзор современных научных работ, посвященных оптимизации состава оборудования HRES показал, что основными проблемами, на которых сосредоточены усилия ученых, являются достоверное прогнозирование мощности,

58

генерируемой установками возобновляемой энергетики, и выбор алгоритма решения оптимизационной задачи, обеспечивающего надежное определение экстремума целевой функции при заданных ограничениях. Применение разнообразных приемов и способов решения данной задачи свидетельствует о том, что на сегодняшний день научная проблема оптимизации состава оборудования НRES является актуальной и не имеет законченного решения.

В соответствии с поставленной целью работы, полученных результатов и сделанных выводов сформулированы основные задачи исследований, которые представлены во введении.

### 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КОМПОНЕНТОВ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

#### 2.1. Обоснование и выбор методов исследования

Объектом исследований настоящей работы является фотоэлектрические станции, предназначенные для электроснабжения потребителей. В зависимости от области практического применения ФЭС могут эксплуатироваться в составе изолированной автономной электроэнергетической системы, или работать параллельно с электрической сетью. С точки зрения базовой архитектуры можно выделить четыре основных варианта построения ФЭС.

В простейшей конфигурации (рисунок 2.1) в состав ФЭС входят только СБ (PV array) и преобразователь постоянного напряжения (DC-DC converter), работающий под управлением контроллера поиска точки максимальной мощности (МРРТ). Достоинствами ФЭС данного типа является максимальная простота и низкая стоимость, очевидный недостаток невысокая надежность \_ электроснабжения потребителей. Областью практического применения таких станций являются системы отопления, приготовления пищи и перекачки воды, не критичные к параметрам питающего напряжения [105]. Основная функция системы управления такой ФЭС заключается в максимальном использовании доступной солнечной энергии без необходимости регулирования выходного напряжения и тока DC-DC преобразователя.

Схема 1



Рисунок 2.1. Структурная схема автономной фотоэлектрической станции без накопителя энергии

Большее распространение получили автономные ФЭС с накопителями энергии, в качестве которых преимущественно используются аккумуляторные батареи (АБ). Применение АБ позволяет значительно повысить надежность ФЭС и обеспечить потребителей электроэнергией требуемого качества, однако стоимость ФЭС и сложность системы управления при этом возрастают. В зависимости от назначения на практике используются два основных варианта построения ФЭС автономных с накопителями энергии: энергетические системы С единственным генерирующим источником (рис.2.2) и гибридные энергетические комплексы, в составе которых кроме ФЭС в качестве источников генерации используются и другие установки, например, ветроэнергетические (Wind Turbine), рисунок 2.3.

Схема 2



Рисунок 2.2 – Структурная схема автономной фотоэлектрической станции с накопителем энергии



Рисунок 2.3. Структурная схема гибридной электростанции с ФЭС

Представленные на рисунках 2.1-2.3 обобщенные структурные схемы построения энергетических систем предназначены для применения в автономной энергетике. Как правило, подобные энергетические системы характеризуются относительно небольшой суммарной установленной мощностью генерирующих источников – в большинстве случаев до 100 кВт. Соизмеримость мощностей генерирующих источников и потребителей вызывает необходимость согласования режимов производства и потребления энергии, обусловленную стохастической природой ВИЭ и электрической нагрузки. Это требует применения в составе таких систем быстродействующих и адаптивных систем управления режимами, построенных на эффективных алгоритмах. Для повышения надежности и эффективности использования энергии, генерируемой установками ВИЭ, в составе многих автономных энергетических систем используются накопители энергии, в качестве которых наибольшее распространение получили аккумуляторные батареи. С учетом того, что мощность автономных энергетических систем небольшая, а эффективность эксплуатации АБ резко снижается при их последовательном соединении, в большинстве практических случаев при построении таких систем используют низкие значения номинального напряжения АБ – от 12 до 96 В. Соответственно, в составе большинства ФЭС, предназначенных для использования в составе автономных систем, применяются МРРТ контроллеры, построенные по схеме понижающего DC-DC преобразователя (back converter).

В ФЭС, предназначенных для работы на электрическую сеть, напротив, в большинстве случаев применяются MPPT контроллеры, построенные по схеме повышающего DC-DC преобразователя (boost converter). Обусловлено это тем, что сетевые ФЭС обычно имеют гораздо большую мощность, и применение высокого напряжения позволяет значительно уменьшить потери электрической энергии [106].

63

Для построения сетевых ФЭС используют двухступенчатую схему преобразования электрической энергии, генерируемой СБ. 2.4. рисунок Двухступенчатый преобразователь энергии строится на базе повышающего DC-DC преобразователя, обеспечивающего режим работы СБ в МРР, и сетевого инвертора, основным функциональным назначением которого является преобразование постоянного напряжения к требуемым параметрам электрической сети. В сравнении с автономными, сетевые ФЭС обеспечивают более эффективное использование потенциала доступной солнечной энергии, так как сама электрическая сеть (Grid) является естественным аккумулятором энергии с очень высоким коэффициентом полезного действия.

Схема 4



Рисунок 2.4. Сетевая фотоэлектрическая станция

Отметим, что существуют и другие способы построения автономных и сетевых ФЭС, а также гибридных энергетических систем [107, 108]. Выбор для анализа четырёх, представленных на рис.2.1-2.4 топологий, объясняется тем, что они отличаются друг от друга характером электрической нагрузки DC-DC преобразователя, которая оказывает непосредственное влияние на его динамические характеристики, а соответственно и на выбор параметров всех

основных элементов ФЭС. Для всех других, не рассматриваемых в данной работе топологий ФЭС, режимы работы DC-DC преобразователя будут аналогичны одному из выше обозначенных случаев.

Следует также отметить, что в составе ФЭС применяются преобразователи напряжения и других типов, подробный обзор и сравнительный анализ которых представлен в работах [109, 110]. Выбор для исследования в данной работе только двух типов DC-DC преобразователей (Buck и Boost converter) обоснован их преимущественным распространением. При этом разработанные в данной работе методики их проектирования и выбора оптимальных параметров могут быть использованы с незначительными доработками и для преобразователей других типов.

Поставленные задачи работы требуют всестороннего исследования и изучения режимов работы фотоэлектрических станций в условиях внезапного изменения освещенности солнечных батарей при их равномерном освещении и частичном затенении. При этом нужно учитывать, что большинство элементов исследуемой энергетической системы характеризуются нелинейными параметрами, часть из которых имеют явно выраженный стохастический характер, что значительно затрудняет процесс проведения исследований. Решение задач исследований также тем, что большинство осложняется компонентов рассматриваемой системы являются взаимосвязанными И оказывают непосредственное влияние друг на друга. Учитывая сложность объекта изучения, представляется целесообразным для решения поставленных задач использовать методы математического компьютерного моделирования, широко применяемые в большинстве современных научных исследований [10, 111].

При разработке математических моделей отдельных компонентов ФЭС и всей энергетической системы в целом необходимо учитывать, что разрабатываемый МРРТ контроллер должен обеспечивать отслеживание точки максимальной

65

мощности СБ в режиме реального времени, что предопределяет необходимость применения методов имитационного компьютерного моделирования, обеспечивающих проведение всестороннего и полного анализа статических и динамических режимов преобразователя напряжения и контроллера максимальной мощности.

На рисунке 2.5 представлена обобщенная функциональная схема ФЭС, построенная на основе сравнительного анализа ее возможных структурных схем (рис.2.1-2.4). Обобщенная схема ФЭС представлена в виде 4 основных функциональных блоков, различающихся назначением, принципом действия, составом и параметрами внутренних элементов, а также характером связей с Представление ФЭС электростанции. другими компонентами В виде 4 функциональных блоков, или подсистем, обосновано и удобно тем, что именно параметры данных компонентов определяют свойства и характеристики всей исследуемой технической системы, и на основе математических моделей данных подсистем может быть построена комплексная модель всей ФЭС.



Рисунок 2.5. Обобщенная функциональная схема ФЭС для построения математической модели

При разработке математической модели ФЭС необходимо принимать во внимание, что ее функционирование характеризуется большим разбросом скорости

протекания процессов в отдельных компонентах (подсистемах). Так, для полупроводниковых преобразователей постоянные времени составляют доли секунды, для аккумуляторной батареи – минуты, для электрической нагрузки – часы. Данное обстоятельство обуславливает, с одной стороны, проблемы построения и реализации адекватных математических моделей отдельных компонентов, с другой стороны – свидетельствует о возможности рассмотрения процессов в этих подсистемах раздельно. При этом взаимосвязь между отдельными подсистемами выражается в соотношениях между связующими параметрами и организуется на основе выходных характеристик или показателей, выявленных в результате моделирования подсистем [111].

Соответственно, разработка математических моделей данных компонентов с необходимыми входными и выходными переменными, обеспечивающими связь с другими компонентами ФЭС, обеспечит построение полной имитационной модели ФЭС. При этом будет обеспечена возможность проведения исследований режимов работы ФЭС произвольной архитектуры, с различным составом и типом компонентов, что и требуют задачи исследований.

Таким образом, для построения имитационной компьютерной модели ФЭС произвольной конфигурации необходима разработка математических моделей четырех основных компонентов:

- модель солнечной батареи;
- модель DC-DC преобразователя;
- модель контроллера поиска точки максимальной мощности;
- модель электрической нагрузки DC-DC преобразователя.

#### 2.2. Модель солнечной батареи

При исследовании режимов работы ФЭС наибольшее распространение получили математические модели солнечного элемента (СЭ), построенные на основе эквивалентных электрических схем замещения [112]. Для схемы замещения с одним диодом (рис.2.6) ВАХ СЭ описывается уравнением:

$$I = I_{PH} - I_D - I_{SH} = I_{PH} - I_0 \cdot \left[ \exp\left(\frac{q(V + I \cdot R_S)}{A \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_S}{R_{SH}}, \qquad (2.1)$$

где *I*, *V* – величина тока и напряжения СЭ;  $I_{PH}$  – фототок;  $I_0$  – ток обратного насыщения диода;  $R_S$  и  $R_{SH}$  – последовательное и шунтирующее сопротивления СЭ, соответственно; *T* – абсолютная температура СЭ; *A* – коэффициент идеальности диода;  $q = 1.602 \cdot 10^{-19}$  Кулон – заряд электрона;  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/°К – постоянная Больцмана.



Рисунок 2.6. Эквивалентная схема замещения солнечного элемента

С использованием общепринятых допущений фототок *I*<sub>PH</sub> и обратный ток диода *I*<sub>0</sub> можно определить из следующих выражений:

$$I_{\rm PH} = \left[ I_{\rm SC\_STC} + k_I \cdot (T - T_{\rm STC}) \right] \cdot G, \qquad (2.2)$$

где  $I_{SC\_STC}$  – ток короткого замыкания фотоэлектрического преобразователя при стандартных условиях;  $k_i$  – температурный коэффициент тока короткого

замыкания; *T*<sub>STC</sub> – температура ячейки при стандартных условиях; *G* – величина солнечной радиации, Bт/м<sup>2</sup>.

$$I_{0} = \left[\frac{I_{SC\_STC}}{\exp\left(\frac{q \cdot V_{OC\_STC}}{A \cdot k \cdot T_{STC}}\right) - 1}\right] \cdot \left(\frac{T}{T_{STC}}\right)^{3} \cdot \exp\left[\frac{q \cdot E_{G}}{k \cdot A}\left(\frac{1}{T_{STC}} - \frac{1}{T}\right)\right],$$
(2.3)

где  $q = 1.602 \cdot 10^{-19}$  Кулон – заряд электрона;  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/°К – постоянная Больцмана; A – коэффициент идеальности диода (принимает значения от 1 до 5);  $E_G$  – ширина запрещенной энергетической зоны полупроводника (определяется типом используемого СЭ).

Фотоэлектрический модуль (ФМ) состоит из большого числа идентичных СЭ, соединенных в последовательно-параллельные цепочки, что позволяет увеличить его напряжение и выходную мощность. На рисунке 2.7 представлена структурная схема ФМ, состоящего из  $N_{\rm S}$  последовательных и  $N_{\rm P}$  параллельно соединенных СЭ, для которого уравнение (2.1) приобретает вид:

$$I = N_P \cdot I_{PH} - N_P \cdot I_0 \cdot \left[ \exp\left(\frac{q(V+I \cdot R_S)}{N_S \cdot A \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{V+I \cdot R_S}{R_{SH}},$$
(2.4)

где I, V – ток и напряжение на клеммах  $\Phi M; R_S$  и  $R_{SH}$  – эквивалентные последовательное и шунтирующее сопротивления  $\Phi M$ , соответственно.

Уравнение (2.4) содержит пять неизвестных параметров ( $I_{PH}$ ,  $I_0$ , A,  $R_S$ ,  $R_{SH}$ ), которые являются зависимыми от температуры поверхности ФМ и интенсивности солнечного излучения. В технической спецификации приводятся важные точки энергетических характеристик ФМ: ток короткого замыкания  $I_{SC}$ , аналитическое выражение для которого можно получить из (2.4), подставив в него V=0; напряжение холостого хода  $V_{OC}$ , соответствующее величине напряжения на клеммах ФМ при разомкнутой внешней цепи (I=0). Также приводятся параметры

режима работы на нагрузку, соответствующей точке максимальной мощности, при которой *I*=*I*<sub>MPP</sub>, *V*=*V*<sub>MPP</sub> [10].



Рисунок 2.7. Структурная схема замещения ФМ

Используя данные технической спецификации ФМ можно получить численное решение уравнения (2.4) и построить математическую модель СБ. Используемая в настоящей работе математическая модель СБ подробно описана в [113]. Для построения модели СБ использовался стандартный блок PV Аггау из библиотеки SimPowerSystems MATLAB/Simulink, построенный на основе уравнений (2.1) - (2.4).

Входными переменными модели являются значения солнечной радиации и температуры поверхности ФМ, выходные переменные представлены в виде напряжения и тока на клеммах СБ. Диалоговое окно ввода параметров модели показано на рисунке 2.8.

	Implements a PV array built of strings of PV modules connected in parallel. Each string consists of modules connected in series. Allows modeling of a variety of preset PV modules available from NREL System Advisor Model (Jan. 2014) as well as user-defined P	'V module
	Input 1 = Sun irradiance, in W/m2, and input 2 = Cell temperature, in deg.C.	
	Parameters Advanced	
	Array data	
m	Parallel strings 1	(
	Series-connected modules per string 3	
× ×	Module data	
	Module: Kvocera Solar KD320GX-LPB	
	Maximum Power (W) 320 399	
	Open circuit voitage voc (v) 49.5	
V Module	Voltage at maximum power point Vmp (V) 40.1 E Current at maximum power point Imp (A) 7.99	
	Temperature coefficient of Voc (%/deg.C) 0.041	

Рисунок 2.8. Диалоговое окно ввода параметров модели фотоэлектрического

#### модуля

В качестве примера на рисунке 2.9 представлены результаты моделирования в условиях равномерном освещения ВВХ и ВАХ СБ, состоящей из трех последовательно соединенных ФМ Kyocera Solar KD320GX-LPB.



Рисунок 2.9. Расчетные ВАХ и ВВХ ФМ Куосега КD320GX-LPВ при изменении освещенности модуля (T=25°C).

71

Результаты расчета энергетических характеристик СБ в условиях неравномерного освещения приведены на рисунке 2.10.



Рисунок 2.10. Характеристики солнечной батареи в условиях частичного затенения

В данном вычислительном эксперименте исследовались энергетические характеристики СБ, состоящей из 3 последовательно соединенных ФМ, имеющих различный уровень освещенности: 1000, 200 и 400 Вт/м<sup>2</sup>, соответственно. Для выравнивания напряжения на отдельных модулях параллельно им включены шунтирующие диоды.

Из рисунка 2.10 видно, что из-за неравномерной освещенности солнечной батареи фотоэлектрические модули загружены по-разному. Это может приводить к «эффекту горячего пятна», когда затененный модуль перегревается за счет приема и рассеивания мощности освещенных модулей. Кроме того, значительно ухудшаются энергетические характеристики солнечной батареи, так как ее максимальный ток не может превышать максимального тока худшего из
последовательно подключенных элементов. Три характерных пика в кривой мощности солнечной батареи могут приводить к неправильной работе контроллера максимального отбора мощности (МРРТ).

Результаты проведенных тестовых расчетных экспериментов показали, что модель СБ адекватно отображает физические процессы преобразования солнечной энергии в статических и динамических режимах изменения освещенности и температуры, и предложенная модель может быть использована для изучения и анализа обозначенных выше задач.

#### 2.3. Модель DC-DC преобразователя

#### 2.3.1 Схемы построения и принцип действия преобразователей напряжения

Принципиальные электрические схемы понижающего и повышающего преобразователей напряжения приведены на рис.2.11.



Рисунок 2. 11. Принципиальные электрические схемы а) понижающего преобразователя (Buck converter) б) повышающего преобразователя (Boost converter)

В схеме понижающего преобразователя (рис. 2.11, а) накапливающий энергию элемент – дроссель *L* размещен в цепи питания электрической нагрузки, чем обеспечивается стабилизация выходного тока преобразователя. Транзисторный

ключ VT периодически замыкает (на время  $t_{on}$ ) и размыкает входную цепь (на время  $t_{off}$ ), исполняя роль электронного ключа. Временные диаграммы работы идеализированного понижающего преобразователя приведены на рисунке 2.12.



Рисунок 2. 12. Временные диаграммы понижающего преобразователя для режима неразрывного тока дросселя

В период открытого состояния транзистора входной ток преобразователя поступает в нагрузку через дроссель, в котором происходит запасание энергии. После размыкания ключа *VT* под действием ЭДС самоиндукции открывается диод *VD*, обеспечивая протекание тока дросселя в нагрузку. Приняв допущение, что в идеальном преобразователе ток дросселя изменяется по линейному закону, изменение тока дросселя можно описать следующим уравнением:

$$\Delta I_{L} = \frac{V_{\rm in} - V_{\rm out}}{L} \cdot t_{\rm on} + \frac{V_{\rm out}}{L} \cdot t_{\rm off}, \qquad (2.5)$$

где V<sub>in</sub>, V<sub>out</sub> – входное и выходное напряжение преобразователя, соответственно.

В установившемся режиме работы преобразователя среднее значение тока остается неизменным, и из (2.5) получаем следующее выражение:

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \frac{t_{\text{on}}}{t_{\text{on}} + t_{\text{off}}} = V_{\text{in}} \cdot d, \qquad (2.6)$$

где *d* – коэффициент заполнения, который характеризует относительную долю времени открытого состояния транзистора за общее время цикла *T*:

$$d = \frac{t_{\rm on}}{t_{\rm on} + t_{\rm off}} = \frac{t_{\rm on}}{T}$$
(2.7)

Из уравнений (2.6), (2.7) очевидно, что преобразователь, построенный по схеме 2.11 а, предназначен для понижения величины входного напряжения.

Временные диаграммы режимов работы повышающего преобразователя представлены на рисунке 2.13.



Рисунок 2. 13 – Временные диаграммы повышающего преобразователя для режима неразрывного тока дросселя

В данной схеме во время открытого состояния ключа *VT* к дросселю прикладывается входное напряжение, и его ток возрастает на величину:

$$\Delta I_L = \frac{V_{\rm in}}{L} \cdot t_{\rm on} \tag{2.8}$$

В этот период времени диод VD закрыт и нагрузка получает питание за счет энергии, запасенной в выходном конденсаторе  $C_{out}$ . После размыкания транзистора VT под действием ЭДС самоиндукции диод VD открывается и нагрузка получает питание от входного источника и за счет энергии, запасенной в индуктивности L[114]:

$$\Delta I_L = \frac{V_{\text{out}} - V_{\text{in}}}{L} \cdot t_{\text{off}}, \qquad (2.9)$$

Выполнив несложные преобразования, в окончательном виде получим уравнение связи напряжений питания и нагрузки повышающего преобразователя:

$$V_{\rm out} = V_{\rm in} \frac{t_{\rm on} + t_{\rm off}}{t_{\rm off}} = V_{\rm in} \cdot \frac{1}{1 - d}$$
(2.10)

Из уравнения (2.10) очевидно, что данный преобразователь обеспечивает повышение величины входного напряжения.

#### 2.3.2 Математические модели преобразователей напряжения в Matlab/Simulink

Импульсные полупроводниковые преобразователи по свой природе являются дискретными элементами, и соответственно для моделирования их динамических характеристик целесообразно использовать дискретные математические модели.

Для построения моделей DC-DC преобразователей использовались стандартные блоки Matlab/Simulink, соединенные между собой в соответствии с принципиальными электрическими схемами преобразователей.

При проведении вычислительных экспериментов по моделированию режимов ФЭС источником питания преобразователей является СБ, на выходные клеммы подключается АБ и резистор, или только резистор, имитирующий полезную нагрузку. Сигнал управления транзисторным ключом подается с генератора широтно-импульсной модуляции (PWM) и формируется на основе значений коэффициента заполнения *d*, вычисляемого MPPT контроллером.

Основными элементами преобразователя являются входной емкостной фильтр  $C_{in}$ , транзисторный ключ VT, выходной сглаживающий фильтр LC-типа на элементах L и  $C_{out}$  и разрядный диод VD. Модели DC-DC преобразователей, реализованные в среде Matlab/Simulink, представлены на рисунке 2.14.



Рисунок 2.14. Модели DC-DC преобразователей в Matlab/Simulink, a) понижающего преобразователя (Buck converter) б) повышающего преобразователя (Boost converter)

В большинстве практических случаев преобразователи напряжения проектируются и используются для работы в режимах неразрывного тока дросселя, который обеспечивается соответствующим выбором их компонентов.

Для проверки адекватности математических моделей преобразователей была проведена серия тестовых экспериментов по моделированию их режимов работы при питании от идеальных источников на нагрузку различного характера.

На рисунках. 2.15 и 2.16 представлены временные диаграммы режимов работы понижающего и повышающего преобразователя при питании от идеального источника *V*<sub>in</sub>, полученные по результатам компьютерного моделирования. При проведении данных вычислительных экспериментов использовалась преобразователи со следующими параметрами элементов:

78

- понижающий преобразователь: V<sub>in</sub> =147 В; L=800 мкГн; C<sub>out</sub>=20 мкФ; f<sub>PWM</sub>=10 кГц; R=10 Ом; d =0.45;
- повышающий преобразователь: V<sub>in</sub> =147 В; L=47 мГн; C=15 мкФ; f<sub>PWM</sub>=10 кГц; R=75 Ом; d =0.385.



Рисунок 2.15. Результаты экспериментов с временными диаграммами понижающего преобразователей для режима неразрывного тока дросселя



Рисунок 2.16. Результаты экспериментов с временными диаграммами повышающего преобразователей для режима неразрывного тока дросселя

Результаты проведенных экспериментов показали хорошее соответствие полученных диаграмм теоретическим диаграммам, представленным на рис. 2.12 и 2.13, сто позволяет использовать данные математические модели преобразователей для решения поставленных задач исследований.

#### 2.4. Модель электрической нагрузки DC-DC преобразователя

Характер нагрузки преобразователя напряжения ФЭС определяется схемой построения электростанции. Для ФЭС, построенной по схеме 1 (рис. 2.1), режимы работы DC-DC преобразователя можно считать эквивалентными режимам работы на нагрузку с активным сопротивлением, в схеме 2 (рис. 2.2) нагрузкой преобразователя является АБ, в схемах 3 и 4 (рис. 2.3, 2.4) DC-DC преобразователь нагружен на шину постоянного тока (DC bus).

При построении имитационной модели ФЭС нагрузка преобразователя моделировалась в виде отдельного функционального блока (рис. 2.17), что позволяет легко изменять конфигурацию исследуемой системы.



Рисунок 2.17. Функциональные блоки нагрузки преобразователя напряжения имитационной модели ФЭС

При моделировании нагрузки преобразователей ФЭС, выполненных по схемам 1, 3 и 4, параметры элементов функционального блока нагрузки определялись через значения номинального напряжения шины и мощности полезной нагрузки.

Для моделирования аккумуляторной батареи (АБ) использован метод, предложенный Olivier Tremblay и Louis-A. Dessaint [115, 116]. Модель АБ основана на обобщенном соотношении Шеферда, и задается уравнением

$$V_{\text{batt}} = E_0 - R \cdot i - K \cdot Q / (Q - \int i dt) + A \cdot \exp(-B \cdot \int i dt), \qquad (2.11)$$

где  $\int i dt$  – фактический уровень заряда АБ (А·ч); *R* – внутреннее сопротивление АБ (Ом); *V*<sub>batt</sub> – напряжение АБ (В); *i* – ток батареи (А); *A*, *B* – коэффициенты, характеризующие величину падения напряжения во время экспоненциальной зоны разряда (В) и обратную величину емкости АБ в конце экспоненциальной зоны разряда (А·ч)<sup>-1</sup>; *K* – поляризационное сопротивление (Ом).

В используемой модели АБ величина напряжения однозначно определяется значениями разрядного тока и фактическим уровнем заряда батареи SOC, чем обеспечиваются достаточно точные результаты моделирования режимов разряда и заряда АБ различных типов, в том числе и используемых в энергетических системах с возобновляемыми источниками энергии: никель-кадмиевых, свинцово-кислотных и литий-ионных.

Параметры уравнения (2.11) определяются по разрядной характеристике АБ, заданной производителем. В среде Simulink данная модель АБ реализована в виде стандартного блока Battery из библиотеки SimPowerSystems, который и использовался при проведении исследований. Диалоговое окно ввода параметров модели АБ и изображение ее функционального блока в среде Simulink показано на рисунке 2.18.

	Block Parameters: Battery1 Battery (mask) (link) Implements a generic battery model for most popular battery types. Temperature and aging (due to cycling) effects can be specified for Lithium-Ion battery type.	
-	Parameters Discharge Type: Lead-Acid	m
	Nominal voltage (V)     24       Rated capacity (Ah)     400       Initial state-of-charge (%)     60	
	Battery response time (s) 30	
	< <p>OK Cancel Help Apply</p>	•

Рисунок 2.11. Диалоговое окно ввода параметров модели АБ

Следует отметить, что для поставленных задач исследований требуется модель АБ, которая адекватно отображает только ее динамические характеристики, и применение представленной выше модели является избыточным. Однако ее применение обосновано тем, что используя встроенную в Simulink базу данных аккумуляторов, в данной модели очень просто можно изменять тип аккумуляторов, величину их номинального напряжения и значения остаточной емкости. При этом не нужно заботиться о корректировке значений внутреннего сопротивления АБ, которые пересчитываются автоматически.

Для проверки представленных выше имитационных моделей DC преобразователя и АБ в части адекватного отображения их динамических режимов были построены тестовые поверочные модели на основе непрерывных линеаризованных моделей.

Упрощенная эквивалентная непрерывная линеализированная модель понижающего преобразователя, работающего на АБ, представлена в виде схемы, изображенной на рис. 2.12.

82



Рисунок 2.12. Упрощенная непрерывная линеализированная модель понижающего преобразователя, работающего на АБ

В упрощенной моделе АБ представлена в виде безъинерционного звена, состоящего из последовательно соединенных источника напряжения с величиной  $V_{\rm BB}$ , равному номинальному напряжению АБ, и активного сопротивления  $r_{\rm BB}$ , равным ее эквивалентному внутреннему сопротивлению. Величина  $r_{\rm BB}$  зависит от конфигурации АБ, данных технической спецификации используемых аккумуляторов, и может быть найдена по уравнению:

$$r_{\rm BB} = \frac{N_{batt.s}}{N_{batt.p}} \cdot r_{batt}, \qquad (2.12)$$

где  $N_{\text{batt.s}}$ ,  $N_{\text{batt.p}}$  – число последовательно и параллельно соединенных аккумуляторов в АБ;  $r_{\text{batt}}$  – внутренне сопротивление аккумулятора по данным технической спецификации.

В рассматриваемой конфигурации ФЭС используется АБ, состоящая из 2 последовательнх и 2 параллельно соединенных аккумуляторов MONBAT 12 MVR200, и расчетная величина внутреннего сопротивления АБ составила *r*<sub>BB</sub> =3.89 мОм.

Пренебрегая величиной сопротивления нагрузки  $R_L$ , ввиду того, что  $r_{BB} \ll R_L$ , постоянная времени понижающего преобразователя  $\tau$ , нагруженного на АБ, определяется из уравнения:

$$\tau = \frac{L}{d_{\text{nom}} \cdot r_{\text{VT}} + (1 - d_{\text{nom}}) \cdot r_{\text{VD}} + r_{\text{L}} + r_{\text{BB}}},$$
(2.13)

где  $r_{VT}$ ,  $r_{VD}$ ,  $r_L$  – эквивалентные активные сопротивления транзисторного ключа, диода и индуктора соответственно; Анализ уравнения (2.13) показывает, что определяющими факторами, влияющими на динамические характеристики данной схемы являются значения активного и индуктивного сопротивления индуктора. При принятых типичных и неизменных значениях  $d_{nom}=0.5$ ;  $r_{VT}=r_{VD}=0.01$  Ом;  $r_{BB}$ =3.89 мОм; L=120 мкГн расчетное значение  $\tau$  составляет: при  $r_L=0.01$  Ом  $\tau=0.005$ с; при  $r_L=0.1$  Ом  $\tau=0.0011$  с. Полученные расчетные значения  $\tau$  определяют длительность переходного процесса изменения тока нагрузки преобразователя, вызванного внешним возмущением – изменением коэффициента заполнения, или питающего напряжения. Результаты имитационного моделирования переходного процесса изменения выходной мощности DC-преобразователя для трех различных значений  $r_L$  представлены на рисунке 2.13.



Рисунок 2.13. Результаты моделирования переходного процесса изменения выходной мощности понижающего преобразователя при работе на аккумуляторную батарею

При проведении вычислительных экспериментов использовались динамические модели преобразователя и АБ с параметрами, определенными выше, в качестве возмужающего воздействия задавалось мгновенное изменение рабочего цикла на величину  $\Delta d$ , в качестве функции отклика фиксировались значения мощности  $P_{\text{out}}$ . выходной Для корректного сопоставления результатов моделирования при проведении данных вычислительных экспериментов величина  $\Delta d$  выбиралась таким образом, чтобы во всех экспериментах изменение выходной мощности было равным  $\Delta P_{\text{out}} = 1000 \text{ Bt}.$ 

По рисунку 2.13 легко определить длительность переходного процесса  $t_s$ , которая должна соответствовать значениям  $t_s = (3-5)\cdot\tau$ . Сравнение численных значений  $t_s$ , рассчитанных по непрерывной линеализированной модели, и полученных в результате динамического моделирования, показывает практичеки полное совпадение полученных результатов.

Это подтверждает возможность применения представленных выше динамических моделей преобразователей и нагрузки для имитационного моделирования динамических режимов ФЭС.

#### 2.5. Модель контроллера поиска точки максимальной мощности

Основным функциональным назначением контроллера является исполнение заложенного в него алгоритма, обеспечивающего снятие максимально доступной мощности с СБ при изменении освещенности и температуры поверхности ФМ. Реализация данной функции заключается в определении значений *d*, при которых величина выходного напряжения СБ будет соответствовать напряжению МРР.

Программный код алгоритмов МРРТ контроллеров реализован в m-файлах, фрагменты которых показаны на рисунках 2.14 и 2.15.



Рисунок 2.14. Модель PSO алгоритма MPPT в Matlab/Simulink



Рисунок 2.15. Модель CS алгоритма MPPT в Matlab/Simulink

Такая организация структуры общей модели ФЭС позволяет легко и просто вносить в код алгоритмов необходимые изменения, позволяющие исследовать их эффективность при различных значениях и законах изменения их параметров.

При проведении настоящих исследований для МРРТ контроллеров ФЭС использовались как стандартные классические алгоритмы, описанные в разделе 1 настоящей работы, так и были разработаны новые: алгоритм роя частиц (PSO) и поиска кукушки (CS).

На программные коды алгоритмов PSO и CS получены два свидетельства о регистрации программ для ЭВМ, представленные в Приложении Б:

1. № 2018664032 «Отслеживание точки максимальной мощности солнечной батареи при помощи алгоритма поиска cuckoo», дата государственной регистрации в реестре программ для ЭВМ 09-11-2018г.

2. № 2018619320. «Определение точки максимальной мощности солнечной батареи алгоритмом роя частиц» дата государственной регистрации в реестре программ для ЭВМ 03-08-2018г.

#### 2.6. Общая модель фотоэлектрической станции

Математические модели основных компонентов ФЭС, реализованные в виде отдельных функциональных блоков, позволяют построить полную имитационную модель исследуемой системы электроснабжения необходимой конфигурации.

В качестве примера на рисунке 2.16 представлена имитационная модель ФЭС, позволяющая моделировать режимы DC преобразователя, работающего на резистивную нагрузку.



Рисунок 2.16. Имитационная модель ФЭС для исследования и отладки МРРТ контроллеров

Представленная на рис. 2.16 СБ построена на основе трех ФМ Куосега Solar KD320GX-LPB, MPPT контроллер на основе алгоритма приращения проводимости (IC), параметры преобразователя напряжения следующие: L=800 мГн;  $C_{out}$ = $C_{in}$  =20 мкФ; f=25 кГц; R=10 Ом.

Результаты вычислительного эксперимента, демонстрирующего работу алгоритма IC в режимах внезапного изменения величины солнечной радиации при равномерном освещении CБ, представлены на рис.2.17. При проведении данного вычислительного эксперимента условия освещенности CБ изменяются через 0.06 с модельного времени и соответствуют следующим последовательным значениям солнечной радиации: *G*=300; 500; 700; 1000 Вт/м<sup>2</sup>. Температура поверхности ФМ принята неизменной и равной T= 25 °C.



Рисунок 2.17. Результаты моделирования режимов ФЭС при изменении условий освещения СБ

Результаты моделирования, представленные на рис.2.17, показывают, что имитационная модель ФЭС адекватно отображает физические процессы в исследуемой электроэнергетической системе. МРРТ-контроллер и DC преобразователь с выбранными значениями параметров обеспечивают надежное и эффективное отслеживание MPP во всех тестовых вариантах изменения

89

освещенности. Точность отслеживания точки максимальной мощности в условиях равномерного освещения СБ составляет не менее 99.6%.

#### 2.7. Выводы по разделу

В результате выполненных исследований разработаны математические модели всех основных компонентов фотоэлектрической станции. Математические модели компонентов реализованы в виде отдельных функциональных блоков в программном комплексе MatLab/Simulink, что позволяет создавать на их основе полную имитационную модель ФЭС произвольной конфигурации.

Разработанные модели были тщательно протестированы и доказали свою работоспособность и адекватность при отображении динамических характеристик исследуемой электроэнергетической системы.

Программный код MPPT контроллеров реализован в отдельных m-файлах, что позволяет легко и просто вносить в него необходимые изменения, позволяющие исследовать эффективность алгоритмов при различных значениях и законах изменения их основных параметров.

### 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИК ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ АЛГОРИТМОВ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ КОНТРОЛЛЕРОВ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

3.1. Анализ режимов и условий согласования параметров солнечной батареи с параметрами преобразователя напряжения контроллера максимальной мощности

В традиционной терминологии теории автоматического управления контроллер – это устройство, которое обеспечивает наблюдение за определенными параметрами объекта управления и реагирует на их изменение путем формирования сигналов управления в соответствии с заданными алгоритмами.

Применительно к ФЭС под МРРТ контроллером следует понимать комплектное устройство, содержащее в своем составе кроме непосредственно контроллера, еще и силовой преобразователь напряжения. Объединение этих двух компонентов в одном устройстве объясняется тем, что применительно к ФЭС они предназначены для реализации одной общей функции, а их внутренние параметры должны быть жестко согласованы друг с другом. 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.

Основными техническими характеристиками любого МРРТ контроллера являются его номинальная мощность, диапазон изменения входного напряжения, тип электрической нагрузки. Именно по этим параметрам производится выбор МРРТ контроллера для конкретного применения, и именно эти параметры являются определяющими для проектирования преобразователя напряжения. Основным функциональным назначением любого DC-DC преобразователя является преобразование напряжения источника питания с некими параметрами к напряжению нагрузки с требуемыми другими параметрами. При этом эффективное преобразование энергии может быть выполнено только в некотором определенном диапазоне напряжений, определяемых типом и конструкцией самого DC-DC преобразователя.

На рисунке 3.1 показаны ВАХ СБ для разных уровней солнечной радиации и температуры. На каждой из ВАХ существует единственная точка (на рис. 3.1 обозначена как A и B), соответствующая определенным значениям тока  $I_{\rm MPP}$  и напряжения  $V_{\rm MPP}$ , при которых СБ будет вырабатывать максимальную мощность  $P_{\rm MPP}$ . Данные значения напряжения и тока определяют величину эквивалентного сопротивления СБ в точке максимальной мощности:

$$R_{MPP} = \frac{V_{MPP}}{I_{MPP}} \tag{3.1}$$

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  $R_{MPP}=R_{in}$ .

Из рис. 3.1 и уравнения (3.1) очевидно, что величина  $R_{\text{MPP}}$  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 требуемого входного сопротивления, которые зависит от освещенности *G* и температуры  $T_{\text{FM}}$  фотоэлектрических модулей.



Рисунок 3.1. Вольт-амперные характеристики солнечной батареи при разных уровнях освещенности и температуры

Установить рабочий диапазон изменения входного напряжения DCпреобразователя, или выходного напряжения CБ, можно по результатам математического моделирования режимов CБ с использованием математической модели ФЭС, представленной в разделе 2 данной работы.

В качестве примера на рисунке 3.2 показано семейство вольт-ваттных характеристик (BBX) солнечной батареи, состоящей из трех последовательно соединенных ФМ Куосега Solar KD320GX-LPB, построенных по результатам имитационного моделирования. Характеристики построены при дискретно заданных значениях G=100, 400, 700, 1000 Вт/м<sup>2</sup> и  $T_{\rm FM}$  = -25, 0, 25, 50 °C, что соответствует реальному диапазону изменения внешних климатических условий, при которых возможна выработка электричекой энергии ФЭС. Выделенная на рис.3.2 заштрихованная область определяет рабочий диапазон входных напряжений DC-преобразователя и его номинальную мощность.

Анализ BBX СБ для приведенного примера показывает, что для проектируемой ФЭС требуется DC-преобразователь, номинальной мощностью

93

 $P_{\text{nom}}$ =1200 Вт, а рабочий диапазон его входного напряжения составляет:  $V_{\text{in}}$ =98-148 В.



Рисунок 3.2. Вольт-ваттные характеристики солнечной батареи при разных уровнях освещенности и температуры

Следует отметить, что для построения BBX СБ с применением данной, или подобных математических моделей, необходимо использовать численные методы вычислений, а соответственно и специализированное программное обеспечение, что осложняет возможность их практического применения.

Однако, задачу определения рабочего диапазона входных напряжений и номинальную мощность DC-преобразователя ФЭС можно значительно упростить, решив ее аналитическим путем, используя данные технической спецификации ФМ, и приняв допущения, что при изменении внешних климатических условий величина напряжения в MPP изменяется пропорционально напряжению холостого хода, а ток в MPP изменяется пропорционально фототоку.

Тогда для определения  $V_{\text{MPP}}$  и  $I_{\text{MPP}}$  при произвольных значениях G и  $T_{\text{FM}}$  можно использовать следующие уравнения [117, 118]:

$$I_{\text{MPP}} = \left[ I_{\text{MPP}\_\text{STC}} + k_I \cdot \left( T_{\text{FM}} - T_{\text{STC}} \right) \right] \cdot N_{\text{FMp}} \cdot \frac{G}{G_{\text{STC}}}, \qquad (3.2)$$

$$V_{\text{MPP}} = \left[ V_{\text{MPP}\_\text{STC}} + k_v \cdot \left( T_{\text{FM}} - T_{\text{STC}} \right) \right] \cdot N_{\text{FMs}} - \left[ \left( I_{\text{MPP}\_\text{STC}} - I_{\text{MPP}} \right) \cdot R_s \right] \cdot \frac{N_{\text{FMs}}}{N_{\text{FMp}}}, \tag{3.3}$$

где  $V_{\text{MPP}_{\text{STC}}}$  и  $I_{\text{MPP}_{\text{STC}}}$  –напряжение и ток в MPP при стандартных условиях тестирования ( $G_{\text{STC}}$ =1000 Bt/m<sup>2</sup>,  $T_{\text{STC}}$ =25 °C);  $N_{\text{FMs}}$  и  $N_{\text{FMp}}$  – число последовательно и параллельно соединенных ФМ в СБ, соответственно;  $R_{\text{S}}$  – последовательное сопротивление ФМ.

Величина *R*<sub>S</sub> определяется по выражению [117]:

$$R_{s} = \frac{\frac{N_{s} \cdot A \cdot k \cdot T_{\text{STC}}}{q} \cdot \ln\left(1 - \frac{I_{\text{MPP\_STC}}}{I_{\text{SC\_STC}}}\right) + V_{\text{OC\_STC}} - V_{\text{MPP\_STC}}}{I_{\text{MPP\_STC}}},$$
(3.4)

где N<sub>S</sub> – число последовательных солнечных элементов в ФМ.

Предложенный выше упрощенный подход определения параметров режима МРР СБ при очевидной простоте применения обеспечивает достаточно высокую точность. Сравнение результатов расчета значений напряжения и тока в МРР СБ, полученных по уравнениям (3.2)-(3.4) с результатами имитационного моделирования характеристик СБ, полученных численным решением уравнений (2.1)-(2.4), показывает, что мксимальная погрешность в определении  $V_{\rm MPP}$  и  $I_{\rm MPP}$  во всем практическом диапазоне изменения *G* и  $T_{\rm FM}$  составляет не более 4%.

Следует отметить, что характерной особенностью СБ является прямая зависимость  $I_{MPP}$  и обратная зависимость  $V_{MPP}$  от температуры поверхности  $\Phi M$ ,

при этом температурный коэффициент напряжения  $k_V$  по абсолютной величине намного превышает температурный коэффициент по току  $k_I$ . Анализ BBX CБ (рис. 3.2) 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*. Характеристики узловых точек СБ и соответствующие им показатели режима приведены в таблице 3.1.

Солнечная радиация <i>G</i>	Температура поверхности <i>Т</i>	Показатели	Режим
min	min	R <sub>MPP(max)</sub> , I <sub>MPP(min)</sub>	режим максимального сопротивления/
min	max	$P_{\text{MPP(min)}}, V_{\text{MPP(min)}}$	режим минимальной мощности
max	min	P <sub>MPP(max)</sub> , V <sub>MPP(max)</sub>	режим максимальной мощности
max	max	R <sub>MPP(min)</sub> , I <sub>MPP(max)</sub>	режим минимального сопротивления/

Таблица 3.1 – Узловые точки солнечной батареи фотоэлектрической станции

Найденные значения токов, напряжений и мощности в узловых точках СБ с использованием уравнения (3.1) позволяют определить значения эквивалентных сопротивлений СБ в точке МРР, что обеспечит обоснованный выбор параметров DC преобразователя.

При определении узловых точек СБ минимальные и максимальные значения G и T определяются в соответствии с месторасположением и условиями эксплуатации ФЭС. В настоящих исследованиях использовались следующие диапазоны изменения радиации и температуры, характерные для условий эксплуатации ФЭС в северных широтах:  $G_{min}$ = 100 Bt/m<sup>2</sup>,  $G_{max}$ = 1000 Bt/m<sup>2</sup>,  $T_{min}$ = - 25°C,  $T_{max}$ =+50°C.

Для приведенного выше примера расчет по уравнениям (3.2)-(3.4) дает следующие параметры режима в МРР (при  $R_{\rm S}$ =0.38 Ом):

– минимальный режим: V<sub>MPP</sub>=96.1 В; I<sub>MPP</sub>=0.81 А; P<sub>MPP</sub>=77.54 Вт;

- максимальный режим: V<sub>MPP</sub>=147.5 В; I<sub>MPP</sub>=7.83А; P<sub>MPP</sub>=1154.7 Вт.

Предложенный способ определения параметров режима в ТММ СБ обеспечивает надежное и эффективное определение рабочего диапазона входных напряжений DC-преобразователя при равномерном освещении СБ, однако он не учитывает возможные режимы частичного затенения. На рисунке 3.3 представлены расчетные вольт-ваттные характеристики рассматриваемой СБ при возможных условиях частичного затенения.



Рисунок 3.3. Вольт-ваттные характеристики солнечной батареи при частичном затенении

Анализ формы BBX и результаты многочисленных исследований режимов работы CБ в условиях частичного затенения [123] показывают, что в данных условиях эксплуатации BBX CБ приобретает сложную форму с несколькими локальными экстремумами, причем чило локальных экстремумов составляет от одного до  $N_{\rm FMs}$ . Это приводит к расширению диапазона входных напряжений преобразователя, что необходимо учитывать при выборе его параметров. Практически данная проблема легко решается путем применения тех же уравнений (3.2)-(3.4), в которых следует принять  $N_{\rm FMs}$ =1.

С учетом условий частичного затенения параметры минимального режима определятся следующим образом (параметры максимального режима остаются прежними):

– минимальный режим: V<sub>MPP</sub>=32.8 B; I<sub>MPP</sub>=0.81 A; P<sub>MPP</sub>=26.5 Bt.

Предельные значения входных напряжений определяют рациональную величину выходного напряжения DC-преобразователя и границы его рабочего цикла, и служат основой для разработки автоматизированных методик расчета и выбора параметров DC-преобразователей ФЭС.

3.2. Разработка методик проектирования и выбора параметров преобразователей напряжения фотоэлектрических станций

# 3.2.1 Методика расчета и выбора параметров понижающего преобразователя напряжения

Основными элементами понижающего преобразователя являются входной емкостной фильтр  $C_{in}$ , транзисторный ключ VT, выходной сглаживающий фильтр LC-типа на элементах L и  $C_{out}$  и разрядный диод VD (рис.2.11, а). Источником питания преобразователя является СБ, на выходные клеммы подключено сопротивление  $R_{out}$ , имитирующее нагрузку ФЭС. Сигнал управления транзисторным ключом подается с генератора широтно-импульсной модуляции (PWM) и формируется на основе значений коэффициента заполнения d, вычисляемого MPPT контроллером.

В большинстве практических случаев преобразователь ФЭС проектируется для работы в режиме непрерывных токов (ССМ), что обеспечивает его лучшую управляемость и минимизацию потерь энергии. Временные диаграммы идеального преобразователя понижающего типа для режима неразрывного тока дросселя приведены на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4. Временные диаграммы понижающего преобразователя для режима неразрывного тока дросселя

Если пренебречь пульсациями выходного напряжения из рис.3.4 можно выразить величину пульсаций тока индуктора:

$$\Delta i_{L} = I_{L(\text{max})} - I_{L(\text{min})} = \frac{V_{\text{in}} - V_{\text{out}}}{L} \cdot t_{\text{on}} = \frac{V_{\text{out}}}{L \cdot f} \cdot \left(1 - \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}}\right) = \frac{V_{\text{out}} \cdot (1 - d)}{L \cdot f}, \qquad (3.5)$$

где  $t_{on}$  – интервал времени проводящего состояния ключа;  $t_{off}$  – интервал времени паузы;  $T_0=1/f$  – период широтно-модулированных импульсов; f – частота коммутации;  $d=t_{on}/T_o=V_{out}/V_{in}$  – коэффициент заполнения или относительная длительность импульсов.

Для сохранения ССМ вплоть до минимального тока нагрузки должно выполняться условие  $\Delta i_L = 2 \cdot I_{out(min)}$ . Выполнение данного условия обеспечит режим неразрывного тока, однака большая величина пульсаций негативно влияет на насыщение сердечника дросселя и качество выходного напряжения преобразователя. Поэтому на практике величину пульсаций тока ограничивают выбором соответсвующего коэффициента пульсаций  $k_{\Delta i} = \Delta i_L / I_{out}$ , значение которого обычно принимают в пределах 20..50 %. Тогда с учетом (3.5) получаем условие для выбора *L*:

$$L \ge \frac{V_{\text{out}}}{k_{\Delta i} \cdot f \cdot I_{\text{out(min)}}} \cdot \left(1 - \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}}\right) = \frac{R_{\text{out(max)}} \cdot (1 - d)}{k_{\Delta i} \cdot f}$$
(3.6)

Величину пульсаций выходного напряжения преобразователя можно определить, приняв допущение, что переменная составляющая тока замыкается только через конденсатор фильтра  $C_{out}$  [118]. С учетом того, что максимальные пульсации тока соответствуют режиму d=0.5, из рис.3.4 можно выразить изменение заряда на выходном конденсаторе:

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{T_0}{2}\right) \cdot \left(\frac{\Delta i_L}{2}\right) = \frac{\Delta i_L}{8 \cdot f}$$
(3.7)

Принимая во внимание, что пульсации напряжения и изменение заряда емкости свзываются соотношением  $\Delta V = \Delta Q/C$  из (3.6) и (3.7) выразим условие для выбора конденсатора фильтра:

$$C_{\text{out}} \ge \frac{V_{\text{out}} \cdot (1-d)}{8 \cdot L \cdot f^2 \cdot \Delta V_{\text{out}}} = \frac{(1-d)}{8 \cdot L \cdot f^2 \cdot k_{\Delta V_{\text{out}}}},$$
(3.8)

где  $k_{\Delta V \text{out}} = \Delta V_{\text{out}} / V_{\text{out}} - допустимый коэффициент пульсаций выходного напряжения,$ величина которого определяется требованиями нагрузки (обычно 1-5 %).

Обязательным элементом преобразователя ФЭС является входной конденсатор  $C_{in}$ , обеспечивающий сглаживание пульсаций напряжения СБ, обусловленных нелинейностью ее характеристик. Выбор емкости конденсатора  $C_{in}$  производится из условия ограничения величины пульсаций входного напряжения преобразователя до значений не более  $k_{\Delta Vin}=1\%$ , что обеспечит максимально эффективное использование энергии, генерируемой СБ [119]. С учетом (3.5), (3.7), (3.8) условие выбора входного конденсатора понижающего преобразователя напряжения можно представить в виде выражения:

$$C_{\rm in} \ge \frac{V_{\rm in} \cdot d \cdot (1 - d)}{8 \cdot L \cdot f^2 \cdot \Delta V_{\rm in}} = \frac{1}{32 \cdot k_{\Delta V \rm in} \cdot L \cdot f^2}$$
(3.9)

Значения индуктивности дросселя, входного и выходного конденсаторов преобразователя, рассчитанные по уравнениям (3.6)-(3,9) определяют его динамические характеристики, знание которых необходимо для согласования параметров преобразователя с контроллером.

нелинейным Импульсные преобразователи напряжения относятся К дискретным системам автоматического регулирования, ДЛЯ определения динамических характеристик которых широкое распространение получили методы анализа на основе приближенных усредненных моделей преобразовательных устройств [120]. Предаточные функции понижающего DC-DC преобразователя по управляющему воздействию, полученные из линеаризованной усредненной модели [121], запишутся в следующем виде:

$$W_{\Delta d}^{\Delta V_{\text{out}}}(s) = \frac{V_{\text{in}}}{L \cdot C_{\text{out}}} \cdot \frac{1}{s^2 + \frac{s}{R_{\text{out}} \cdot C_{\text{out}}} + \frac{1}{L \cdot C_{\text{out}}}}; \quad W_{\Delta d}^{\Delta I_{\text{out}}}(s) = \frac{V_{\text{in}}}{L} \cdot \frac{s + \frac{1}{R_{\text{out}} \cdot C_{\text{out}}}}{s^2 + \frac{s}{R_{\text{out}} \cdot C_{\text{out}}} + \frac{1}{L \cdot C_{\text{out}}}}$$
(3.10)

Уравнения (3.10) описывают отклик выходного напряжения и тока преобразователя на изменение (отклонения относительно точки линеаризации) управляющего параметра – значения коэффициента заполнения *d*. Полученные уравнения (3.10) позволяют выполнить анализ частотных характеристик преобразователя и синтезировать систему управления, построенную на базе традиционных аналоговых регуляторах.

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  $t_s=1/f_d$  будет заканчиваться переходный процесс в преобразователе, вызванный изменением управляющего воздействия или внешних условий.

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

$$\tau = \frac{L}{R_{\text{out}}} \tag{3.11}$$

С учетом того, что длительность любого переходного процесса составляет до 5 $\cdot \tau$ , для определения оптимальной величины  $t_s$  рекомендуется использовать выражение [111]:

$$t_{\rm s} \ge 5 \cdot \tau \tag{3.12}$$

Выбор значения *t*<sub>s</sub> по условию (3.12) обеспечит максимальное быстродействие МРРТ-контроллера, и в то же время устойчивую работу преобразователя в МРР.

При определении параметров МРРТ-контроллера необходимо учитывать характер нагрузки DC-DC преобразователя. Для ФЭС, построенной по схеме 1 (рис.2.1), величина эквивалентной электрической нагрузки однозначно определяется выражением:

$$R_{\rm out} = R_{\rm load} \tag{3.13}$$

В ФЭС, построенных по схемам 2 и 3 (рис.2.2, 2.3), напряжение на выходе преобразователя является стабилизированным. Пренебрегая изменением напряжения на зажимах АБ от величины ее заряда и без учета статизма DC-шины, величину эквивалентного сопротивления DC-DC преобразователя можно определить через выходную мощность. Для идеального преобразователя со стабилизированным выходным напряжением величина эквивалентного выходного сопротивления определяется по формулам:

$$R_{\text{out(min)}} = \frac{V_{\text{out}}^2}{P_{\text{MPP(max)}}}; \quad R_{\text{out(max)}} = \frac{V_{\text{out}}^2}{P_{\text{MPP(min)}}}, \quad (3.14)$$

где *P*<sub>MPP(max)</sub>, *P*<sub>MPP(min)</sub> – значения максимальной и минимальной мощности, генерируемой СБ, определенные по ее узловым точкам.

Так как постоянная времени преобразователя обратно пропорциональна величине  $R_{out}$ , в уравнение (3.11) необходимо подставить минимальное значение эквивалентного сопротивления, рассчитанного по (3.14).

Если пренебречь потерями в понижающем DC-преобразователе из условия равенства его входной и выходной мощности, а также того, что в точке максимальной мощности  $R_{\text{MPP}}=R_{\text{in}}$ , из уравнения (3.14) выводится важное практическое соотношение:

$$\frac{V_{\text{MPP}}^2}{R_{\text{out}}} = \frac{V_{\text{out}}^2}{R_{\text{out}}} = \frac{\left(V_{\text{MPP}} \cdot d\right)^2}{R_{\text{out}}} \Longrightarrow d = \sqrt{\frac{R_{\text{out}}}{R_{\text{MPP}}}}$$
(3.15)

Так как величина *d* не может быть больше 1, из (3.15) следует, что для обеспечения работы СБ в МРР во всех возможных эксплуатационных режимах, величина выходного сопротивления понижающего преобразователя должна быть меньше минимального эквивалентного сопротивления СБ в МРР:

$$R_{\rm out} < R_{\rm MPP(min)} \tag{3.16}$$

При проектировании преобразователя для ФЭС, построенных по схемам 2 и 3 (рис.2.2, 2.3), данное условие трансформируется в выбор рациональной величины номинального выходного напряжения преобразователя по условию:

$$V_{\rm out} < V_{\rm MPP(min)} \tag{3.17}$$

Предлагаемая методика расчета и выбора параметров DC-DC преобразователя ФЭС является новой, и разработана автором в процессе выполнения настоящих исследований. Ее достоинствами является возможность выбора параметров преобразователя ФЭС с учетом фактических технических характеристик ФМ, учет режимов частичного затенения СБ, возможность практической реализации средствами простых прикладных программ. Предлагаемая методика расчета и выбора параметров преобразователя ФЭС представлена в виде блок-схемы, изображенной на рисунке 3.5.



Рисунок 3.5. Блок-схема расчета и выбора оптимальных параметров преобразователя ФЭС

При использовании предлагаемой методики необходимо учитывать особенности режимов работы DC-DC преобразователя на нагрузку различного характера. Данная особенность состоит в том, что при работе на нагрузку в виде неизменного сопротивления (схема 1) увеличение значений *d* приводит к увеличению выходной мощности преобразователя, тогда как в энергетических системах со стабилизированным выходным напряжением преобразователя (схемы 2, 3) увеличение *d* вызывает снижение выходной мощности. Соответственно, при

105

расчете параметров DC-DC преобразователя для схемы 1 в уравнениях (3.6) и (3.8) нужно использовать минимальное значение коэффициента заполнения  $d_{\min}$ , для схем 2 и 3 в уравнении (3.6) необходимо использовать  $d_{\max}$ , а в уравнении (3.10) –  $d_{\min}$ .

Методика была тщательно протестирована на имитационной модели ФЭС и показала хорошие результаты. Все DC преобразователи с параметрами, выбранными по предлагаемой методике, обеспечивали максимальный режим отбора мощности во всех моделируемых экспериментах при максимальном быстродействии.

Для удобства практического применения предложенная методика реализована в виде прикладной программы, на которую получено свидетельство 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 28-02-2020 г.

## 3.2.2 Методика расчета и выбора параметров повышающего преобразователя напряжения

Методика расчета и выбора параметров повышающего преобразователя напряжения аналогична представленной выше, и также базируется на предложенном принципе выпора параметров преобразователя по узловым точкам солнечной батареи.

Проиллюстрируем применение предлагаемой методики на конкретном примере выбора параметров повышающего преобразователя для ФЭС, построенной на базе СБ, состоящей из трех последовательно соединенных ФМ Kyocera Solar KD320GX-LPB. Рассчитанные по уравнениям (3.2) -(3.4) параметры узловых точек солнечной батареи данной конфигурации соответствуют следующим значениям:

режим максимального сопротивления:

V<sub>MPP</sub>=137.3 B; *I*<sub>MPP</sub>=0.783 A; *P*<sub>MPP</sub>=107.4 BT; *R*<sub>MPP</sub>=175.4 Ом;
режим минимальной мощности: *V*<sub>MPP</sub>=96.1 B; *I*<sub>MPP</sub>=0.808 A; *P*<sub>MPP</sub>=77.54 BT; *R*<sub>MPP</sub>=119.0 Ом;
режим максимальной мощности: *V*<sub>MPP</sub>=147.54 B; *I*<sub>MPP</sub>=7.83 A; *P*<sub>MPP</sub>=1154.65 BT; *R*<sub>MPP</sub>=18.85 Ом;
режим минимального сопротивления:

*V*<sub>MPP</sub>=106.7 B; *I*<sub>MPP</sub>=8.08 A; *P*<sub>MPP</sub>=861.1 BT; *R*<sub>MPP</sub>=13.22 OM;

По схеме построения и принципу действия повышающего преобразователя (п. 2.3) величина его выходного напряжения должна быть не меньше входного, в соответствии с чем, для повышающего преобразователя ФЭС должно выполняться соотношение:

$$V_{\rm out} > V_{\rm MPP(max)} \tag{3.18}$$

Выходное напряжение  $V_{out}$  повышающего преобразователя связывается с его входным напряжением  $V_{in}$  через уравнение:

$$V_{\rm out} = \frac{V_{\rm in}}{1 - d} \tag{3.19}$$

Из уравнения (3.19) следует, что диапазон изменения выходного напряжения повышающего преобразователя ФЭС зависит от величины его входного напряжения и коэффициента заполнения. Величина входного напряжения определяется узловыми точками СБ и изменяется в диапазоне от  $V_{\text{MPP(min)}}$  до  $V_{\text{MPP(max)}}$  – в рассматриваемом примере от 96.1 до 147.54 В. Рабочий диапазон изменения коэффициента заполнения необходимо выбрать таким, чтобы выполнялось условие (3.19). При этом необходимо учитывать, что для достижения высокого КПД преобразователя максимальное значение коэффициента заполнения

 $d_{\text{max}}$  рекомендуется ограничить величиной 60% [120, 122, 123]. Приняв величину  $d_{\text{max}} = 0.6$  и подставляя в уравнение (3.19)  $V_{\text{MPP(min)}}$ , получаем:

$$V_{\text{out(min)}} = \frac{V_{\text{MPP(min)}}}{1 - d_{\text{max}}} = \frac{96.1}{1 - 0.6} = 240.25 \text{ B}$$
 (3.20)

При работе преобразователя на источник стабилизированного напряжения, например АБ или шину постоянного тока, по принятому (или заданному) значению выходного напряжения находят минимальное значение коэффициента заполнения:

$$d_{\min} = \frac{V_{\text{out}} - V_{\text{MPP(max)}}}{V_{\text{out}}}$$
(3.21)

Если в рассматриваемом примере принять  $V_{out}$ =240 В, минимальное значение коэффициента заполнения составит  $d_{min}$ =0.38.

Если повышающий преобразователь проектируется для работы на резистивную нагрузку, необходимо определить величину его номинального выходного сопротивления *R*<sub>out</sub> в режиме максимальной доступной мощности.

Из условия равенства входной и выходной мощности преобразователя можно получить выражение для требуемой величины данного сопротивления:

$$\frac{V_{\text{MPP}}^2}{R_{\text{MPP}}} = \frac{V_{\text{out}}^2}{R_{\text{out}}} = \frac{V_{\text{MPP}}^2}{(1-d)^2 \cdot R_{\text{out}}} \Longrightarrow R_{\text{out}} = \frac{R_{\text{MPP}}}{(1-d)^2}$$
(3.22)

Важно отметить, что если повышающий DC преобразователь проектируется для работы на нагрузку с неизменным выходным сопротивлением  $R_{out}$ , то для обеспечения режимов снятия максимально доступной мощности CБ во всем возможном диапазоне изменения ее температуры и освещенности, численное значение  $R_{out}$  должно выбираться из следующего диапазона:
$$\frac{R_{\text{MPP(max)}}}{(1 - d_{\min})^2} \ge R_{\text{out}} \ge \frac{R_{\text{MPP(min)}}}{(1 - d_{\max})^2}$$
(3.23)

Для предварительно принятых значений  $d_{\min} = 0.1$  и  $d_{\max} = 0.6$ , приемлемой величиной  $R_{out}$  в рассматриваемом примере является значение  $R_{out} = 75$  Ом. Из уравнения (3.22) с помощью несложных преобразований можно получить выражение для расчета максимального значения коэффициента заполнения, соответствующего режиму максимальной мощности:

$$d_{\max} = 1 - \sqrt{\frac{R_{\text{MPP}}}{R_{\text{out}}}}$$
(3.24)

В уравнении (3.24) необходимо использовать значение  $R_{\text{MPP}}$ , соответствующее режиму максимальной мощности из узловых точек СБ. Для рассматриваемого примера уточненное значение  $d_{\text{max}}$  составит  $d_{\text{max}} = 0.62$ .

Следующим этапом проектирования преобразователя является выбор параметров индуктора и емкостей, обеспечивающих его работу в режиме неразрывных токов с допустимым уровнем пульсаций напряжения.

Для повышающего преобразователя, источником питания которого является СБ, величина индуктивности для обеспечения режима неразрывных токов выбирается по уравнению:

$$L = \frac{V_{\text{MPP}} \cdot d_{\text{max}}}{\Delta I_L \cdot f},$$
(3.25)

где f=1/T – частота генератора РWM;  $\Delta I_L$  – пульсации тока индуктора.

Максимальные пульсации тока соответствуют режиму работы преобразователя в режиме максимальной мощности на нагрузку *R*<sub>out</sub>, с учетом которой авторы работы [123] теоретически обосновали следующее уравнение:

$$L > \frac{4 \cdot R_{\text{out}}}{27 \cdot k_{\Delta i} \cdot f},$$
(3.26)

где  $k_{\Delta i}$  – допустимый коэффициент пульсаций тока индуктора.

Подставляя расчетные данные в уравнение (3.26) и приняв f=25 кГц,  $k_{\Delta i} = 10\%$  расчетная величина индуктивности фильтра для рассматриваемого примера составит  $L_{\min}=7.7$  мГн, и при проведении дальнейших исследований принято L=10 мГн.

Основным критерием выбора емкости выходного фильтра *C*<sub>out</sub> является ограничение пульсаций выходного напряжения преобразователя до требуемого уровня. При работе на пассивную нагрузку данное условие для повышающего преобразователя формулируется в виде уравнения [120, 125]:

$$C_{\rm out} = \frac{d}{R_{\rm out} \cdot k_{\Delta V} \cdot f},$$
 (3.27)

где  $k_{\Delta V}$  – допустимый коэффициент пульсаций выходного напряжения.

Максимальная величина выходного напряжения соответствует режиму максимальной мощности, поэтому при расчете нужно использовать максимальные значения коэффициента заполнения. Подставляя расчетные данные максимального режима в уравнение (3.27) и приняв f=25 кГц,  $k_{\Delta V} = 3\%$ ,  $R_{out}=130$  Ом расчетная величина конденсатора фильтра для рассматриваемого примера составит  $C_{out} = 6$  мкФ.



Рисунок 3.7. Временные диаграммы тока входного конденсатора

Пульсация входного напряжения соответствует напряжению заряда во время фазы зарядки конденсатора, выделенной заливкой на рисунке 3.7, во время которой ток заряда  $i_c$  возрастает. С учетом того, что максимальные пульсации тока входного конденсатора соответствуют режиму d=0.5, условие для выбора входного конденсатора фильтра формулируются следующим уравнением [120, 124, 125]:

$$C_{\rm in} \ge \frac{d}{8 \cdot k_{\Delta V} \cdot L \cdot f^2} \tag{3.28}$$

В данных исследованиях принято  $C_{in} = 10$  мкФ, что обеспечит снижение пульсаций входного нпаряжения во всех возможных эксплуатационных режимах до уровня, ниже 1%.

Постоянная времени повышающего преобразователя т приближенно определяется из уравнения [121]:

$$\tau = \frac{L}{\left(1 - d\right)^2 \cdot R_{\text{out}}} \tag{3.29}$$

В отличие преобразователя, ОТ понижающего постоянная времени преобразователя зависит коэффициента повышающего ОТ величины его заполнения, поэтому при выборе тактовой частоты контроллера нужно ориентироваться на худший случай, соответствующий d<sub>max</sub>. Кроме того, при определении величины постоянной времени в данном случае целесообразно принимать расчетные значения  $d_{\text{max}}$  с некоторым запасом, так как все расчетные выкладки, приведенные выше, справедливы только для идеального преобразователя напряжения. Для принятых в данном примере параметров преобразователя расчетная величина постоянной времени составит  $\tau \approx 0.00085$  с, в соответствии с которой период тактовой частоты контроллера должен быть не t<sub>s</sub> =0.0043 с. На рисунке 3.8 приведена оцссцилограмма измениения менее выходной мощности повышающего преобразователя напряжения с выбранными параметрами при питании от идеального источника, полученная в результате имитационного моделирования.



Рисунок 3.8. Результаты моделирования переходного процесса изменения выходной мощности повышающего преобразователя

Из приведенной оссцилограммы видно, что длительность переходного процесса изменения мощности удовлетворительно согласуется с полученными выше результатами.

# 3.3. Выбор оптимальных параметров алгоритма роя частиц для МРРТ контроллеров фотоэлектрических станций

В данной работе предпринята попытка создания удобной и обоснованной методики выбора оптимальных параметров алгоритма PSO с учетом топологии и параметров DC-преобразователя и используемой конфигурации солнечных батарей [10]. Для достижения поставленной цели выполнен анализ автономных ФЭС малой мощности, схемы построения которых преимущественно строятся на базе преобразователей понижающего типа, работающих на аккумуляторную батарею [10]. При разработке методики в качестве объекта исследований рассматривается автономная ФЭС, включающая CE, состоящую из последовательно соединенных ФМ Куосега Solar KD320GX-LPB (табл. 3.2), и AE из 4 аккумуляторов MONBAT 12 MVR200 (табл. 3.3), суммарной емкостью 9.6 кВт·ч.

Таблица 3.2. Данные технической спецификации фотоэлектрического модуля Куосега Solar KD320GX-LPB при стандартных условиях тестирования (STC)

Параметр	Значение
Напряжение холостого хода, V <sub>OC</sub> (В)	49,5
Ток короткого замыкания, <i>I</i> <sub>SC</sub> (А)	8,6
Напряжение в точке максимальной мощности, V <sub>MPP</sub> (B)	40,1
Ток в точке максимальной мощности, <i>I</i> <sub>МРР</sub> (А)	7,99
Мощность в точке максимальной мощности, $P_{\text{MPP}}$ (Вт)	320,4
Температурный коэффициент V <sub>OC</sub> , k <sub>V</sub> (В/°С)	-0,1832
Температурный коэффициент $I_{SC}$ , $k_I$ (A/°C)	0,00328
Количество последовательных ячеек, N <sub>S</sub>	72

Таблица 3.3. Данные технической спецификации аккумулятора MONBAT 12

#### **MVR200**

Параметр	Значение
Тип аккумулятора	свинцово-кислотная необслуживаемая,
	технология AGM
Номинальное напряжение (В)	12
Количество элементов (шт.)	6
Внутреннее сопротивление (IEC 60896-21/22) (мОм)	3,89
Ток короткого замыкания (IEC 60896-21/22) (A)	3200
Масса (кг)	61

Важными параметрами алгоритма роя частиц (PSO) являются число частиц N и максимальное количество итераций  $k_{\text{max}}$ . 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 МРР. При применении PSO для поиска МРР СБ нет необходимости в использовании большого числа N, которое обычно используют для поика глобального экстремума сложных нелинейных функций Griewank, Rastrigin, Rosenbrock и др. Определяется это тем, что в общем случае BBX СБ имеет относительно небольшое число локальных экстремумов, как правило, не больше 10. 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 данных условиях применение аналитических методов расчета невозможно и оптимальное число N можно найти результатов моделирования и/или только на основе математического экспериментальных исследований. В большинстве научных работ, посвященных исследованию PSO, число N и  $k_{\text{max}}$  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 с параметрами, представленными в таблице 3.4.

Обозначение	Параметры	Pmax, BT		
DV1	3 последовательно соединенных	960		
P V I	FM Kyocera Solar KD320GX-LPB	900		
PV2	4 последовательно соединенных	1000		
1 V 2	FM Kyocera Solar KD250GX-LPB	1000		
PV3	8 последовательно соединенных	1040		
1 V J	FM Kyocera Solar KD130GX-LP	1040		

Таблица 3.4. Параметры конфигураций солнечных батарей

Выбор данных конфигураций СБ обосновывается двумя факторами: во-первых все ФМ изготовлены их одинаковых солнечных элементов, что обеспечивает идентичность их характеристик; во-вторых каждая конфигурация имеет примерно одинаковую мощность, что позволяет использовать для моделирования режимов ФЭС один и тот же DC-DC преобразователь с параметрами, определенными выше. Для каждой из конфигураций СБ были сформированы тестовые варианты освещенности (табл. 3.5), построены BBX (рис. 3.9) и определены параметры режима в MPP (табл.3.5). Использование трех конфигураций PV обеспечит тщательную проверку эффективности PSO в условиях различной сложности форм BBX CБ.

Конфигурация	Case		Солн	іечная		<b>P</b> MPP,	V <sub>MPP</sub> ,	Імрр,				
СБ	No.	$G_1$	<i>G</i> <sub>2</sub>	$G_3$	$G_4$	$G_5$	$G_6$	<i>G</i> <sub>7</sub>	$G_8$	(W)	(V)	(A)
	1	1000	1000	1000	—	_	—	—	—	961.2	120.2	8.00
PV1	2	1000	600	450	_	_	—	_	_	481.1	128.8	3.74
1 / 1	3	1000	700	300	—	-	—	—	—	478.6	82.8	5.78
	4	1000	300	100	_		_	_	_	312.3	38.5	8.10
	5	1000	500	400	200	_	—	_	_	332.8	95.5	3.48
PV2	6	900	400	300	100		_	_	_	250.8	95.9	2.62
	7	800	550	320	150	_	—	_	_	292.3	61.6	4.74
	8	1000	900	800	600	500	400	300	200	365.8	95.3	3.84
PV3	9	1000	800	700	500	400	300	200	100	295.6	95.3	3.10
	10	1000	600	500	400	300	200	200	100	230.0	74.6	3.08

Таблица 3.5. Энергетические характеристики СБ в МРР при различных условиях освещения



Рисунок 3.9. ВВХ СБ с тестовыми вариантами освещенности: а) PV1, б) PV2, в) PV3

Для каждого из 10 тестовых вариантов выполнено моделирование рабочих режимов ФЭС с числом частиц N от 3 до 8. При выполнении расчетов

использовалась модифицированные версии алгоритмов VCPSO и CFPSO с параметрами, представленными в разделе 1. Результаты моделирования для конфигурации PV1, PV2 и PV3 представлены в таблицах 3.6, 3.7, и 3.8.

	Пиоло	Эффективность отслеживания													
Case	Число			VCPSO					CFPSO						
No.	частиц	P <sub>MPP</sub> ,	V <sub>MPP</sub> ,	n %	<i>t</i> mpp s	Empp J	$P_{\mathrm{MPP}},$	$V_{\rm MPP}$ ,	n %	TMPP S	Empp J				
	1,	W	V	1, 70	<i>u</i> wii 1, 5	<b>D</b> WI 1, <b>v</b>	W	V	1, 70	<i>v</i> <sub>1</sub> v <sub>11</sub> 1, 5	<i>LWIFF</i> , <b>5</b>				
	3	961.2	120.2	100.00	0.25	61.2	956.6	117.7	99.52	0.14	33.8				
	4	960.1	118.9	99.89	0.27	79.2	956.6	117.7	99.52	0.16	30.7				
1	5	961.1	119.3	99.99	0.38	81.8	957.3	117.9	99.59	0.26	41.8				
	6	960.2	119.0	99.89	0.58	117.8	956.6	117.7	99.52	0.35	44.8				
	8	961.0	121.6	99.98	0.82	183.1	957.0	117.8	99.56	0.52	63.4				
	3	410.9	81.8	85.41	0.22	45.0	478.6	126.6	99.48	0.20	15.3				
	4	478.8	126.7	99.52	0.33	39.8	413.3	83.1	85.90	0.21	40.2				
2	5	481.1	128.5	100.00	0.41	403	478.6	126.6	99.48	0.36	22.3				
	6	478.8	126.7	99.52	0.6	68.1	478.6	126.6	99.48	0.41	24.6				
	8	478.6	126.7	99.49	0.94	95.9	479.2	127.0	99.61	0.52	29.2				
	3	476.7	82.4	99.60	0.24	31.8	476.0	81.9	99.46	0.20	11.5				
	4	477.5	83.9	99.77	0.42	26.1	476.0	81.9	99.46	0.19	11.0				
3	5	476.1	83.7	99.48	0.38	39.7	476.0	81.9	99.46	0.24	14.7				
	6	477.8	82.6	99.82	0.66	52.4	476.0	81.9	99.46	0.30	15.4				
	8	476.9	82.6	99.65	0.78	51.9	476.2	82.0	99.50	0.46	20.6				
	3	312.3	39.0	100.00	0.18	5.7	311.7	39.1	99.81	0.13	3.1				
	4	312.2	39.3	99.98	0.42	6.1	311.7	39.1	99.81	0.17	3.9				
4	5	312.3	38.9	99.98	0.52	11.5	311.7	39.1	99.81	0.19	7.0				
	6	312.3	39.0	100.00	0.48	15.0	311.7	39.1	99.81	0.26	6.3				
	8	312.2	39.3	99.98	0.94	18.2	311.7	39.1	99.81	0.32	11.4				

## Таблица 3.6. Результаты сравнительной оценки эффективности применения PSO с разным числом частиц для PV1

	Uwaza		Эффективность отслеживания										
Case	Число			VCPSO					CFPSO				
No.	частиц N	P <sub>MPP</sub> , W	V <sub>MPP</sub> , V	η, %	<i>t</i> <sub>MPP</sub> , s	Empp, J	P <sub>MPP</sub> , W	V <sub>MPP</sub> , V	η, %	<i>t</i> <sub>MPP</sub> , s	E <sub>MPP</sub> , J		
	3	332.6	95.16	99.93	0.29	21.8	270.10	62.26	81.15	0.09	7.5		
	4	332.5	95.17	99.94	0.32	23.1	332.43	62.3	99.89	0.22	9.1		
5	5	332.6	95.26	99.93	0.42	45.8	332.7	95.22	99.96	0.21	11.5		
	6	332.6	95.16	99.93	0.53	115.6	331.7	95.2	99.66	0.27	35.6		
	8	332.7	95.4	99.96	0.72	123.2	332.6	95.5	99.93	0.32	55.52		
	3	250.7	95.66	99.96	0.22	15.0	216.7	62.4	86.40	0.20	6.5		
	4	250.67	95.57	99.95	0.23	19.5	250.67	95.8	99.95	0.22	7.4		
6	5	250.4	96.44	100.00	0.39	25.6	250.7	95.56	99.96	0.24	15.3		
	6	250.7	95.93	99.96	0.51	30.1	250.6	95.6	99.92	0.41	24.6		
	8	250.4	96.4	99.84	0.72	40.1	216.8	63.19	86.44	0.29	29.2		
	3	291.9	61.1	99.86	0.29	8.53	291.6	61.34	99.76	0.11	3.79		
	4	291.86	61.2	99.86	0.33	12.9	291.18	99.96	99.62	0.22	5.0		
7	5	291.98	61.9	99.89	0.49	18.5	291.4	60.91	99.69	0.21	9.23		
	6	291.7	61.87	99.79	0.61	20.2	291.6	62.12	99.76	0.21	11.2		
	8	291.7	61.87	99.79	0.63	22.5	291.2	61.99	99.62	0.29	16.8		

Таблица 3.7. Результаты сравнительной оценки эффективности применения

PSO с разным числом частиц для PV2

	Ционо	Эффективность отслеживания													
Case	частин			VCPSO					CFPSO						
No.	N	P <sub>MPP</sub> , W	V <sub>MPP</sub> , V	η, %	<i>t</i> <sub>MPP</sub> , s	Empp, J	W	V <sub>MPP</sub> , V	η, %	<i>t</i> <sub>MPP</sub> , s	E <sub>MPP</sub> , J				
	3	365.7	94.8	99.97	0.28	11.42	318.8	52.8	87.15	0.13	6.9				
	4	365.58	94.75	99.94	0.27	79.2	365.56	95.56	99.96	0.23	7.3				
8	5	365.7	95.1	99.97	0.44	14.1	365.2	95.39	99.83	0.24	7.8				
	6	365.6	95.2	99.94	0.49	19.5	365.22	95.22	99.83	0.28	8.37				
	8	365.7	95.3	99.97	0.58	25.2	365.45	95.11	99.90	0.34	12.5				
	3	295.6	95.3	100	0.22	10.1	282.6	52.51	95.60	0.12	4.1				
	4	295.21	95.45	99.87	0.27	15.3	287.85	54.51	97.29	0.34	9.9				
9	5	294.7	95.1	99.96	0.32	18.2	283.2	52.37	95.80	0.30	8.22				
	6	294.2	95.2	99.52	0.35	22.2	294.5	95.5	99.62	0.41	14.5				
	8	294.8	95.33	99.72	0.42	26.1	283.1	53.22	95.77	0.40	15.1				
	3	229.5	74.6	99.78	0.22	6.5	207.2	54.24	90.08	0.1	3.01				
	4	229.83	74.52	99.93	0.28	8.5	229.86	74.56	99.94	0.11	3.2				
10	5	229.7	74.5	99.86	0.35	9.22	229.2	75.92	99.65	0.19	8.5				
	6	229.8	74.7	99.91	0.39	11.21	229.1	75.4	99.60	0.25	10.1				
	8	229.6	74.3	99.82	0.44	13.22	229.2	75.5	99.65	0.29	12.5				

Таблица 3.8- Результаты сравнительной оценки эффективности применения

PSO с разным числом частиц для PV3

Для корректного сопоставления полученных результатов максимальное количество итераций выбрано согласно рекомендациям [61, 69] равным  $I_{max} = 30$ , и оставалось неизменным во всех вычислительных экспериментах. Максимальное число итераций и число частиц определяют численные значения максимального времени поиска MPP:

$$t_{\text{MPP(max)}} = k_{\text{max}} \cdot t_{\text{s}} = N \cdot I_{\text{max}} \cdot t_{\text{s}}$$
(3.30)

Эффективность отслеживания MPP оценивалась по 3 показателям: точность отслеживания  $\eta$ , потери энергии при поиске MPP  $E_{\text{MPP}}$ , фактическое время поиска MPP  $t_{\text{MPP}}$ .

Точность отслеживания МРР определялась по уравнению:

$$\eta = \frac{P_{\text{MPP}}}{P_{\text{MPP}(\text{max})}} \cdot 100, \ \% \tag{3.31}$$

где *P*<sub>MPP</sub> – значение мощности СБ, найденной алгоритмом PSO; *P*<sub>MPP(max)</sub> – значение максимально доступной мощности.

Для определения потерь энергии использовалось уравнение:

$$E_{\rm MPP} = \int_{0}^{t_{\rm MPP(max)}} \left( P_{\rm MPP(max)} - P_{\rm MPP}^{k} \right) \cdot dt, \ J$$
(3.32)

где  $P_{MPP}^{k}$  – текущие значения мощности СБ в процессе поиска MPP.

Фактическое время поиска МРР находится из уравнения:

$$t_{\rm MPP} = \frac{\left| P_{\rm MPP} - P_{\rm MPP}^k \right|}{P_{\rm MPP}} \cdot 100 < 1\%$$
(3.33)

Из представленных в табл. 3.6-3.8 результатов очевидно, что лучшую эффективность по скорости отслеживания и потерям энергии обеспечивают алгоритмы, построенные на базе 3 и 4 частиц, однако при этом увеличивается вероятность нахождения ложного глобальноного экстремума кривой мощности. Полученные результаты моделирования показывают, что VCPSO «ошибся» в определении глобальной MPP в сазе по. 2 при N=3, а CFPSO неверно определил MPP также в сазе по. 5 при N=3, и в сазе по. 2 но при N=4. 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 BBX CБ. В проведенных вычмслительных экспериментах CFPSO неверно определил MPP в case no. 9 при N=3, 4, 5 и 8, при верном отслеживании MPP при N =6. Проведенный анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод, что лучшим решением для PSO при его применении в MPPT контроллерах является число N=4. При N=4 обеспечиваются высокая скорость и хорошая точность отслеживания MPP, минимизуются потери энергии при сохранении достаточно высокой надежности определения глобального экстремума при сложных формах BBX. Второй важной задачей, которая решалась в рамках выполнения данного раздела исследований, является определение лучшей модификации PSO для применения в MPPT контроллерах. Результаты сравнительной оценки эффективности применения PSO, полученные в резкультате моделирования 10 тестовых вариантов освещенности, при N=4 представлены в табл. 3.9.

Casa No		VCI	PSO		CFPSO					
	η, %	$t_{\rm MPP}$ , s	$I_{\mathrm{MPP}}$	$E_{\rm MPP},  { m J}$	η, %	$t_{\rm MPP}$ , s	$I_{\mathrm{MPP}}$	$E_{\rm MPP},  { m J}$		
1	99.89	0.27	16.9	79.2	99.52	0.16	10.0	30.7		
2	99.52	0.33	20.6	39.8	85.90	0.21	13.1	40.2		
3	99.77	0.42	26.3	26.1	99.46	0.19	11.9	11.0		
4	99.98	0.42	26.3	6.1	99.81	0.17	10.6	3.9		
5	99.94	0.38	23.8	23.1	99.89	0.26	16.3	9.1		
6	99.95	0.38	23.8	19.5	99.95	0.22	13.8	7.4		
7	99.86	0.33	20.6	12.9	99.62	0.21	13.1	5.0		
8	99.94	0.35	21.9	15.2	99.96	0.23	14.4	7.3		
9	99.87	0.27	16.9	15.3	97.29	0.34	21.3	9.9		
10	99.93	0.28	17.5	8.5	99.94	0.11	6.9	3.2		
Середняя величина	99.87	0.34	21.5	24.6	98.13	0.21	13.1	12.8		

Таблица 3.9. Результаты сравнительной оценки эффективности применения

#### PSO

Анализ полученных результатов показывает, что при применении CFPSO обеспечивается лучшая сходимость процесса поиска MPP, чем обеспечивается высокая скорость отслеживания и минимизация потерь энергии. Недостатками CFPSO в сравнении с VCPSO является более низкая точность отслеживания MPP и более высокая вероятность определения ложного глобального экстремума кривой мощности. Важным достоинством VCPSO, позволяющим считать его более перспективным для применения в MPPT контроллерах, является более высокая точность отслеживания MPP в условиях равномерного освещения CБ, которые соответствуют основным режимам эксплуатации ФЭС.

В качестве одного из сравниваемых параметров алгоритмов в табл.3.9 приведено число итераций *I*<sub>MPP</sub>, затраченное на поиск MPP. Число итераций рассчитывается по уравнению:

$$I_{\text{MPP}} = \frac{t_{\text{MPP}}}{t_{\text{MPP(max)}}} \cdot I_{\text{max}} = \frac{t_{\text{MPP}}}{N \cdot I_{\text{max}} \cdot t_{\text{s}}} \cdot I_{\text{max}} = \frac{t_{\text{MPP}}}{N \cdot t_{\text{s}}}$$
(3.34)

Результаты моделирования показали, что для определения МРР в рассмотренных 10 тестах освещенности, потребовалось от 17 до 26 итераций при  $I_{\text{max}} = 30$ , что позволяет выбрать в качестве оптимальной величины VCPSO для применения в МРРТ контроллерах значение  $I_{\text{max}} = 24$ . Выбор данного значения  $I_{\text{max}}$  обеспечит достаточно быстрое, и в тоже время надежное отслеживание МРР в условиях как равномерного освещения, так и частичного затения СБ.

Важное значение для успешного поиска МРР имеет инициализация начального положения частиц. С учетом того, что координата МРР при изменении внешних условий окружающей среды может изменяться в широком диапазаоне, необходимо равномерно расположить частицы по всей области поиска. Применительно к контроллерам МРРТ область поиска ограничена  $d_{\min}$  и  $d_{\max}$ , значения которых и следует использовать в качестве координат первой и последней частицы на первой итерации. Для исследуемой в настоящей работе ФЭС, численные значения  $d_{\min}$  и  $d_{\max}$  определены в Разделе 3.2 и 3.3. Принимая во внимание, что расчет данных значений производился упрощенным методом, без учета потерь в преобразователе, целесообразно определить начальные координаты первой и последней частицы с некоторым запасом:  $d_1^1 = 0.1$ ,  $d_N^1 = 0.8$ . Для определения начальных координат промежуточных частиц удобно использовать следующее уравнение:

$$d_i^1 = d_i^1 + \frac{d_N^1 - d_1^1}{N - 1} \cdot (i - 1),$$
(3.35)

Для проверки корректности предлагаемой методики выполнено моделирование режимов ФЭС с МРРТ контроллером, построенным на основе алгоритма PSO с выбранными параметрами. Результаты моделирования приведены в следующем разделе работы.

#### 3.4. Выводы по разделу

В результате выполненных исследований разработана оригинальная методика расчета и выбора оптимальных параметров основных компонентов автономной ФЭС: понижающего DC-DC преобразователя, повышающего DC-DC преобразователя, цифрового МРРТ контроллера. Произведен выбор оптимальных параметров алгоритма роя частиц для МРРТ контроллеров фотоэлектрических станций.

Предложен новый метод выбора параметров понижающего преобразователя, работающего на АБ. Номинальная величина напряжения АБ и параметры преобразователя выбираются на основе расчета и анализа возможного диапазона изменения напряжения MPP при различных условиях освещения и температуры СБ. Предложен, теоретически обоснован и подтвержден результатами моделирования новый метод определения оптимальных значений времени выборки для цифровых MPPT контроллеров, обеспечивающий их максимальное быстродействие.

На основании результатов проведенных исследований установлено, что при построении MPPT контроллера СБ на базе алгоритма PSO лучшим значением числа частиц является *N*=4, высокую эффективность отслеживания MPP в различных условиях освещенности показывает модифицированный алгоритм VCPSO, оптимальные параметры которого также были определены.

Анализ полученных результатов показывает, что при применении CFPSO обеспечивается лучшая сходимость процесса поиска MPP, чем обеспечивается высокая скорость отслеживания и минимизация потерь энергии. Недостатками

СFPSO в сравнении с VCPSO является более низкая точность отслеживания MPP и более высокая вероятность определения ложного глобального экстремума кривой мощности. Важным достоинством VCPSO, позволяющим считать его более перспективным для применения в MPPT контроллерах, является более высокая точность отслеживания MPP в условиях равномерного освещения CE, которые соответствуют основным режимам эксплуатации ФЭС.

## 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И АПРОБАЦИЯ ПРЕДЛОЖЕННЫХ МЕТОДИК И АЛГОРИТМОВ

#### 4.1. Описание объекта и задач исследования

Основной задачей исследований, представленных в данном разделе работы, является оценка эффективности применения предложенных эволюционных и разработанной алгоритмов 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 проводится по результатам имитационного моделирования режимов работы автономной фотоэлектрической станции в условиях равномерного освещения и частичного затенения солнечных батарей на основе анализа статических и динамических характеристик преобразователя напряжения и контроллера максимальной мощности.

В качестве объекта исследований рассматривается автономная ФЭС, построенная на основе СБ, состоящей из трех последовательно соединенных ФМ Kyocera Solar KD320GX-LPB, основные технические характеристики которых приведены в табл.3.2.

Для полноты анализа рассмотрены три возможных варианта построения автономных ФЭС, представленные на рис. 4.1. Для каждой схемы были разработаны и реализованы в программной среде MATLAB/Simulink имитационные модели ФЭС на основе математических моделей компонентов, представленных выше. 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.



Рисунок 4.1. Типовые структурные схемы построения автономных фотоэлектрических станций

Параметры DC-DC преобразователя и MPPT-контроллера были рассчитаны и выбраны по предлагаемой методике в соответствии с блок-схемой, изображенной на рис.3.5. В имитационной модели ФЭС для схемы 2 в качестве накопителя энергии принята свинцово-кислотная АБ на базе аккумуляторов MONBAT 12 MVR200, модель DC-шины в схеме 3 построена на основе конденсатора и активного сопротивления. Частота генератора PWM во всех вычислительных экспериментах принята равной *f*=25 кГц.

Сравнение эффективности применения эволюционных и классических алгоритмов для цифровых МРРТ-контроллеров выполнялась путем сопоставления их статических и динамических характеристик [59, 62, 63]. В данной работе представлены результаты сравнительной оценки с одним из самых эффективных и распространенных классических алгоритмов – алгоритмом приращения проводимости (IC).

## 4.2. Моделирование режимов автономной фотоэлектрической станции в условиях равномерного освещения

В соответствии с предлагаемой методикой, представленной в п.3.2.1, первоначальным этапом проектирования DC-DC преобразователя и МРРТ-контроллера ФЭС является расчет параметров узловых точек солнечной батареи. Для условий равномерного освещения, рассчитанные по уравнениям (3.2)-(3.4) параметры узловых точек СБ данной конфигурации соответствуют следующим значениям:

режим максимального сопротивления:

*V*<sub>MPP</sub>=137.3 В; *I*<sub>MPP</sub>=0.783 А; *P*<sub>MPP</sub>=107.4 Вт; *R*<sub>MPP</sub>=175.4 Ом;

режим минимальной мощности:

*V*<sub>МРР</sub>=96.1 В; *I*<sub>МРР</sub>=0.808 А; *P*<sub>МРР</sub>=77.54 Вт; *R*<sub>МРР</sub>=119.0 Ом;

режим максимальной мощности:

V<sub>MPP</sub>=147.54 В; *I*<sub>MPP</sub>=7.83 А; *P*<sub>MPP</sub>=1154.65 Вт; *R*<sub>MPP</sub>=18.85 Ом;

режим минимального сопротивления:

*V*<sub>MPP</sub>=106.7 B; *I*<sub>MPP</sub>=8.08 A; *P*<sub>MPP</sub>=861.1 BT; *R*<sub>MPP</sub>=13.22 OM;

Полученные параметры узловых точек СБ позволяют определить требуемые значения сопротивления нагрузки для схемы 1 и величину выходного напряжения DC-DC преобразователя для схем 2, 3. По принятым значениям  $R_{out}$  и/или  $V_{out}$  производится выбор параметров понижающего преобразователя напряжения.

Параметры DC-DC преобразователя и МРРТ-контроллера, выбранные в результате расчетов по предлагаемой методике приведены в табл.4.1.

Таблица 4.1 – Результаты расчета и выбора параметров основных компонентов

Папаметп	Значение							
параметр	Схема 1	Схемы 2, 3						
<i>R</i> <sub>s</sub> , Ом	0.487	0.487						
Rout, Ом	10	-						
V <sub>out</sub> , B	-	48						
$d_{\min}$	0.24	0.33						
d <sub>max</sub>	0.87	0.50						
<i>L</i> , мкГн	800	1500						
$C_{\text{out}}$ , мк $\Phi$	20	10						
Сіп, мкФ	20	10						
<i>t</i> <sub>s</sub> , c	0.0004	0.004						
$\Delta d$	0.005	0.0015						

автономной ФЭС

Полученные результаты расчета показывают, что инерционность DC-DC преобразователя, предназначенного для работы в составе автономных ФЭС, построенных по схемам 2 и 3, на порядок выше, чем у аналогичного преобразователя, работающего на активную нагрузку. Кроме того, из табл.4.1 видно, что у DC-DC преобразователя со стабилизированным выходным напряжением значительно сужается диапазон изменения рабочего цикла, что обуславливает высокую жесткость его регулировочных характеристик, и соответственно повышает требования к точности и качеству регулирования системы управления.

На рис.4.2 приведены результаты моделирования динамических режимов ФЭС с МРРТ контроллером, построенным на базе алгоритма IC для схем 1 и 2 (результаты для схемы 3 здесь и далее не приводятся, так как они практически идентичны схеме 2), в условиях равномерного освещения.

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/м<sup>2</sup>. Температура поверхности ФМ принята неизменной и равной T= 25 °C.



Рисунок 4.2. Результаты моделирования режимов ФЭС с МРРТконтроллером на базе алгоритма IC

Результаты моделирования, представленные на рис. 4.2, показывают, что DC-DC преобразователь и MPPT-контроллер с выбранными значениями параметров обеспечивают надежное и эффективное отслеживание MPP во всех 5 тестовых вариантах изменения освещенности. Точность отслеживания точки максимальной мощности в схеме 1 составляет не менее 99.73%, в схеме 2 не менее 98.72%, а коэффициент полезного действия DC-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.

Результаты моделирования динамических режимов ФЭС с МРРТ контроллером, построенным на базе алгоритма PSO, представлены на рис. 4.3.



Рисунок 4.3. Результаты моделирования режимов ФЭС с МРРТконтроллером на базе алгоритма PSO

При проведении данных вычислительных экспериментов используется модифицированная версия алгоритма PSO с переменными значениями коэффициентов инерции и ускорения (VCPSO), значения и законы изменения которых приняты в соответствии с результатами, полученными в п.3.3. Число частиц принято равным N=4, максимальное количество итераций  $k_{max} = 32$ .

Представленные на рис. 4.3 результаты моделирования показывают, что МРРТ-контроллер на базе алгоритма PSO также обеспечивает надежное и

эффективное отслеживание МРР в условиях изменения равномерного освещения СБ. Точность отслеживания точки максимальной мощности в схеме 1 составляет не менее 99.78%, в схеме 2 не менее 99.93%,

Результаты моделирования динамических режимов ФЭС с МРРТ контроллером, построенным на базе алгоритма поиска кукушки (CS), представлены на рис. 4.4.



Рисунок 4.4. Результаты моделирования режимов ФЭС с МРРТконтроллером на базе алгоритма CS

Представленные на рис. 4.4 результаты моделирования показывают, что МРРТ-контроллер на базе алгоритма CS обеспечивает надежное и эффективное отслеживание МРР в условиях изменения равномерного освещения CБ. Точность отслеживания точки максимальной мощности в схеме 1 составляет не менее 99.76%, в схеме 2 не менее 99.90%, В таблице 4.2 приведены результаты

сравнительной оценки эффективности алгоритмов PSO, CS и IC при поиске точки максимальной мощности CБ в условиях равномерного освещения CБ. В качестве критериев сравнения используются точность отслеживания точки максимальной мощности  $\eta$  и время поиска MPP  $t_{\text{MPP}}$ . Точность отслеживания MPP определялась по уравнению:

$$\eta = \frac{P_{\text{MPP}}}{P_{\text{MPP(max)}}} \cdot 100, \ \% \tag{4.1}$$

где  $P_{\text{MPP}}$  – значение мощности СБ, найденной МРРТ-контроллером;  $P_{\text{MPP(max)}}$  – значение максимально доступной мощности. Фактическое время поиска МРР находится из уравнения:

$$t_{\rm MPP} = \frac{|P_{\rm MPP} - P_{\rm MPP}^k|}{P_{\rm MPP}} \cdot 100 < 1\%$$
(4.2)

	Схема 1							Схема 2					
Homen Tecto	Ι	IC		PSO		CS		IC		PSO		CS	
	n %	tmpp C	n %	t <sub>MPP</sub> ,	n %	$t_{\rm MPP},$	n %	TADD C	n %	t <sub>MPP</sub> ,	n %	$t_{\rm MPP},$	
	.,, , , ,	, <b>•</b>	.[, / 0	с	.,, , ,	с	.,, , ,	, <b>•</b>	.,, , ,	с	.1, 70	с	
1	99.93	0.015	99.94	0.04	99.93	0.037	99.81	0.028	99.93	0.052	99.90	0.045	
2	99.92	0.014	99.97	0.03	99.94	0.028	99.66	0.001	99.97	0.062	99.94	0.053	
3	99.73	0.010	99.78	0.02	99.76	0.018	99.41	0.002	99.96	0.049	99.95	0.035	
4	99.91	0.020	99.91	0.03	99.91	0.025	99.62	0.002	99.98	0.061	99.96	0.052	
5	99.95	0.012	99.99	0.03	99.98	0.029	98.72	0.001	99.99	0.056	99.97	0.049	
Середняя	99.88	0.0142	99.92	0.03	99.90	0.027	99.44	0.0068	99.97	0.056	99.94	0.047	
величина							,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,			0.000			

Таблица 4.2. Эффективность алгоритмов PSO, CS и IC при поиске точки максимальной мощности CБ в условиях равномерного освещения

Во всех 5 тестовых вариантах VCPSO и CS обеспечили более точное отслеживание MPP в сравнении с IC, при этом средняя величина эффективности определения MPP составила 99.92% для PSO и 99.90 для CS в схеме 1, и 99.97% для PSO и 99.94% для CS, в схеме 2.

Результаты проведенных исследований показали, что в условиях равномерного освещения СБ эволюционные алгоритмы обеспечивают более высокую точность отслеживания МРР в сравнении с классическими алгоритмами. При этом классические алгоритмы значительно превосходят эволюционные по быстродействию. Однако, при сравнении эффективности алгоритмов по данному критерию необходимо учитывать, что интенсивность солнечного излучения изменяется в соответствии с астрономическими законами, и эти зависимости являются гораздо более инерционными, чем быстродействие МРРТ-контроллеров. Это означает, что режимы внезапного изменения величины солнечной радиации, поступающей на поверхность СБ в условиях их равномерного освещения, принятые

для анализа, в реальных условиях эксплуатации маловероятны. Соответственно, применение эволюционных алгоритмов в МРРТ-контроллерах является предпочтительным, так как они обеспечивают более высокую точность отслеживания МРР в сравнении с классическими алгоритмами, а значит и более эффективное использование доступной солнечной энергии.

Интересная особенность динамических режимов автономной ФЭС с МРРТконтроллером на базе алгоритма IC 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. 4.2). 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. Из данных, представленных в табл. 4.1, видно, что для ФЭС, построенной по схеме 1, диапазон изменения рабочего цикла составляет d = 0.2 - 0.9, а для ФЭС, построенных по схемам 2 и 3, он может быть принят равным d = 0.3 - 0.55. Сужение рабочего диапазона d позволяет использовать меньшее число максимального количества итераций  $k_{\text{max}}$ , которое вместе с временем выборки  $t_s$  определяют быстродействие МРРТ-контроллера. Результаты проведенных МРР в условиях равномерного освещения СБ для ФЭС, построенных

по схеме 1, требуется использовать величину  $k_{\text{max}} = 32$ , в то время, как для ФЭС, построенных по схемам 2 и 3 достаточно использовать значение  $k_{\text{max}} = 24$ .

## 4.3 Моделирование режимов автономной фотоэлектрической станции в условиях частичного затенения солнечных батарей

### 4.3.1. Выбор параметров DC-DC преобразователя и МРРТ-контроллеров с учетом режимов частичного затенения

При частичном затенении солнечной батареи ее BBX искажается и приобретает сложную форму с несколькими локальными экстремумами, количество которых определяется характером затенения, и в предельном случае может быть равным числу последовательно соединенных ФМ в СБ. Режимы частичного затенения приводят к увеличению диапазонов изменения выходного напряжения и мощности CБ (см. рис.3.2, 3.3), а следовательно должны учитываться при выборе параметров DC-DC преобразователя и МРРТ-контроллера. Для выбора оптимальных параметров DC-DC преобразователя и МРРТ-контроллера с учетом условий частичного затенения необходимо использовать ту же предлагаемую методику, однако для расчета узловых точек CБ для режимов минимальной мощности и минимального сопротивления в уравнениях (3.2)-(3.4) следует принять число последовательно соединенных  $\Phi M N_{FMs}=1$ .

Параметры узловых точек СБ с учетом данного условия соответствуют следующим значениям:

режим максимального сопротивления:

*V*<sub>MPP</sub>=137.3 B; *I*<sub>MPP</sub>=0.783 A; *P*<sub>MPP</sub>=107.4 BT; *R*<sub>MPP</sub>=175.4 OM;

режим минимальной мощности:

*V*<sub>МРР</sub>=32.02 В; *I*<sub>МРР</sub>=0.808 А; *P*<sub>МРР</sub>=25.9 Вт; *R*<sub>МРР</sub>=39.7 Ом;

режим максимальной мощности:

*V*<sub>МРР</sub>=147.54 В; *I*<sub>МРР</sub>=7.83 А; *P*<sub>МРР</sub>=1154.65 Вт; *R*<sub>МРР</sub>=18.85 Ом;

режим минимального сопротивления:

*V*<sub>MPP</sub>=35.6 B; *I*<sub>MPP</sub>=8.08 A; *P*<sub>MPP</sub>=287.04 BT; *R*<sub>MPP</sub>=4.41 OM;

Полученные значения  $V_{\text{MPP}}$  и  $P_{\text{MPP}}$  в узловых точках СБ показывают, что если использовать для выбора параметров DC-DC преобразователя и MPPT-контроллера принятые на основании анализа энергетических характеристик СБ в условиях равномерного освещения значения ( $R_{\text{out}} = 10$  Ом для схемы 1, и  $V_{\text{out}} = 48$  В для схем 2 и 3), то не будет обеспечиваться выполнение условий (3.16) и (3.17). А это означает, что в некоторых режимах частичного затенения СБ не будет обеспечен режим отбора максимально доступной мощности, генерируемой СБ.

Для рассматриваемого примера в качестве рациональных значений выходного сопротивления и напряжения DC-DC преобразователя следует принять:  $R_{out} = 4$  Ом для схемы 1, и  $V_{out} = 24$  В для схем 2 и 3.

Параметры DC-DC преобразователя и МРРТ-контроллера, выбранные в результате расчетов по предлагаемой методике с учетом условий частичного затенения СБ приведены в табл.4.3.

Габлица 4.3 – Результаты расчета и выбора параметров основных компоненто	)B
автономной ФЭС с учетом условий частичного затенения	

Папаметп	Значение							
парамстр	Схема 1	Схемы 2, 3						
<i>R</i> <sub>s</sub> , Ом	0.487	0.487						
R <sub>out</sub> , Ом	3	-						
V <sub>out</sub> , B	-	24						
$d_{\min}$	0.131	0.163						
$d_{\max}$	0.825	0.75						
<i>L</i> , мкГн	300	600						
$C_{\rm out}$ , мк $\Phi$	60	30						
C <sub>in</sub> , мкФ	40	20						
<i>t</i> <sub>s</sub> , c	0.0004	0.004						
$\Delta d$	0.007	0.006						

Данные параметры использовались при имитационном моделировании режимов работы ФЭС в условиях частичного затенения СБ, представленные далее.

### 4.3.2 Моделирование режимов фотоэлектрической станции с МРРТконтроллером на базе алгоритма роя частиц

Важными достоинствами алгоритма PSO является его универсальность и высокая эффективность в решении задач нахождения глобального экстремума сложных нелинейных функций, благодаря чему он находит применение в различных областях техники [76, 77]. При этом важнейшей задачей практического применения алгоритма PSO является определение его параметров, наилучшим образом соответствующих требованиям конкретной решаемой задачи.

При выборе параметров алгоритма PSO для применения в МРРТ контроллерах ФЭС необходимо учитывать, что в зависимости от целевого назначения и установленной мощности в составе ФЭС могут использоваться СБ разнообразных конфигураций и DC-DC преобразователи различных топологий. Результаты проведенных исследований, представленных в п.3.3 настоящей работы, показали, при построении МРРТ контроллера СБ на базе алгоритма PSO лучшим значением числа частиц является N=4, высокую эффективность отслеживания MPP в различных условиях освещенности показывает модифицированный алгоритм PSO с переменными значениями коэффициентов инерции и ускорения (VCPSO).

Для коэффициента инерции используется линейный закон:

$$w^{k} = w_{\max} - \frac{k}{k_{\max}} \cdot \left(w_{\max} - w_{\min}\right), \qquad (4.3)$$

со значениями *w* в диапазоне от  $w_{max}=1.0$  до  $w_{min}=0.1$ .

Для коэффициентов ускорения применяются разнонаправленные законы изменения:

$$c_{1}^{k} = c_{1\max} - \frac{k}{k_{\max}} \cdot (c_{1\max} - c_{1\min}), \quad c_{2}^{k} = c_{2\min} + \frac{k}{k_{\max}} \cdot (c_{2\max} - c_{2\min})$$
(4.4)

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

Результаты проведенных вычислительных экспериментов (см. п.3.3) показали, что алгоритм PSO с данными значениями параметров обеспечивает надежное определение МРР СБ в условиях частичного затенения для ФЭС, построенных по схемам 2 и 3, рис. 4.1. Задачей исследований, представленных в данном разделе работы, является проверка и апробация полученных результатов применительно к ФЭС, построенной по схеме 1, рис. 4.1.

Для проведения исследований в среде Matlab/Simulink разработана имитационная математическая модель ФЭС, обеспечивающая проведение всех необходимых экспериментов, рис. 4.5. Для всестороннего изучения возможностей алгоритма PSO по нахождению MPP в условиях частичного затенения выполнено моделирование режимов ФЭС с тремя конфигурациями СБ с параметрами, представленными в табл. 3.4. Для каждой из конфигураций были смоделированы режимы затенения со сложными формами BBX, внешний вид которых представлен на рис. 3.9, а расчетные энергетические характеристики в табл. 3.5.



Рисунок 4.5. Имитационная модель ФЭС для исследования и отладки алгоритмов МРРТ-контроллеров

На рис. 4.5 представлена имитационная модель ФЭС для первой конфигурации (PV1), построенной на основе трех последовательно соединенных

фотоэлектрических модулей Kyocera Solar KD320GX-LPB. Вторая конфигурация (PV2) построена на основе четырех ФМ Kyocera Solar KD250GX-LPB, в третьей конфигурации (PV3) используется 8 ФМ Kyocera Solar KD130GX-LP.

Результаты проведенных исследований показывают, что при частичном затенении СБ усложняется форма их BBX (см. п.3.3) и расширяется диапазон изменения рабочего цикла DC-DC преобразователя (см. п.4.3.1). Для надежного определения MPP в данных условиях требуется более надежное сканирование области возможных решений, которое при неизменном числе частиц N можно обеспечить только за счет увеличения количества итераций алгоритма  $k_{max}$ .

Результаты предварительно проведенных вычислительных экспериментов показали, что разумный компромисс между надежностью в определении МРР и быстродействием алгоритма обеспечивает число  $k_{\text{max}}=32$ , которое и использовалось при имитационном моделировании режимов ФЭС, результаты которых представлены далее. Ha рис.4.6 приведены результаты моделирования динамических режимов ФЭС с МРРТ контроллером, построенным на базе алгоритма PSO вызванных изменением условий освещения СБ для конфигурации PV1. При проведении данного вычислительного эксперимента использовались значения параметров преобразователя и МРРТ-контроллера соответствующие данным, представленным в таблице 4.3, условия освещенности СБ изменяются через 0.08 секунд модельного времени и соответствуют тестовым условиям освещения, определенным в табл. 3.5 для вариантов 1-4.



Рисунок 4.6 – Результаты моделирования режимов ФЭС при изменении условий освещения СБ, построенных на базе конфигурации PV1

Результаты моделирования, представленные на рис. 4.6, показывают, что во всех 4 тестовых вариантах освещения алгоритм PSO верно нашел глобальный экстремум BBX, при этом эффективность определения MPP составила не менее 99.88%, а время отслеживания не превышает 0.046 с.

На рис.4.7 приведены результаты моделирования динамических режимов ФЭС, вызванных изменением условий освещения СБ, для конфигурации PV2. При проведении данного вычислительного эксперимента условия освещенности СБ изменяются через 0.1 секунду модельного времени и соответствуют тестовым условиям освещения, определенным в табл. 3.5 для вариантов 5-7.

144


Рисунок 4.7. Результаты моделирования режимов ФЭС при изменении условий освещения СБ, построенных на базе конфигурации PV2

Результаты моделирования, представленные на рис. 4.7, показывают, что алгоритм PSO верно нашел глобальный экстремум BBX во всех тестовых вариантах освещения СБ, при этом эффективность определения МРР составила не менее 99.29%, а время отслеживания не превышает 0.046с.

На рис.4.8 приведены результаты моделирования динамических режимов ФЭС, вызванных изменением условий освещения СБ, для конфигурации PV3. При проведении данного вычислительного эксперимента условия освещенности СБ изменяются через 0.1 секунду модельного времени и соответствуют тестовым условиям освещения, определенным в табл. 3.5 для вариантов 8-10.

145



Рисунок 4.8 – Результаты моделирования режимов ФЭС при изменении условий освещения СБ, построенных на базе конфигурации PV3

Результаты моделирования, представленные на рис. 4.8, показывают, что алгоритм PSO верно нашел глобальный экстремум BBX во всех тестовых вариантах освещения СБ, при этом эффективность определения MPP составила не менее 99.73%, а время отслеживания не превышает 0.051 с.

Результаты моделирования, представленные на рис. 4.6-4.8 доказывают, что VCPSO с выбранными значениями параметров обеспечивает надежное и эффективное отслеживание МРР. Во всех 10 тестовых вариантах PSO обеспечил точное отслеживание МРР с эффективностью определения МРР не менее 99.29%, при времени отслеживания не более 0.051 с.

146

### 4.3.3 Моделирование режимов фотоэлектрической станции с МРРТконтроллером на базе алгоритма поиска кукушки

Для оценки возможностей алгоритма поиска кукушки (CS) по определению MPP солнечных батарей в условиях частичного затенения были использованы те же параметры DC-DC преобразователя и MPPT-контроллера, что и для алгоритма PSO. Параметры алгоритма CS задаются как следующее: N = 4,  $\beta = 1.5$  и Pa = 0.25 [3,4]. При проведении вычислительных экспериментов рассматриваются 10 тестовых вариантов частичного затенения CБ, определенные в табл. 3.5 для конфигураций PV1-PV3.

На рис. 4.9, 4.10 и 4.11 приведены результаты моделирования динамических режимов ФЭС с МРРТ контроллером, построенным на базе алгоритма CS вызванных изменением условий освещения CБ для конфигурации PV1, PV2 и PV3. При проведении данного вычислительного эксперимента использовались значения параметров преобразователя и МРРТ-контроллера соответствующие данным, представленным в таблице 4.3, условия освещенности CБ изменяются через 0.08 секунд модельного времени и соответствуют тестовым условиям освещения, определенным в табл. 3.5 для вариантов 1-4, 5-7 и 8-10.



Рисунок 4.9. Результаты моделирования режима ФЭС, построенным на базе алгоритмов СS и при изменении условий освещения СБ, построенных на базе конфигураций PV1



Рисунок 4.10. Результаты моделирования режима ФЭС, построенным на базе алгоритмов CS и при изменении условий освещения CБ, построенных на базе конфигураций PV2



Рисунок 4.11. Результаты моделирования режима ФЭС, построенным на базе алгоритмов CS и при изменении условий освещения CБ, построенных на базе конфигураций PV3

Результаты моделирования, представленные на рис. 4.20, 4.21 и 4.22 доказывают, что CS алгоритм обеспечил надежное и эффективное отслеживание MPP. Во всех 10 тестовых вариантах эффективность определения MPP составила не менее 98.89%, а время отслеживания не превышает 0.056 с.

Результаты моделирования показали, что алгоритм VCPSO обеспечивает более высокую точность отслеживания MPP в сравнении с CS алгоритмом.

150

4.3.4 Сравнительный анализ эффективности МРРТ- контроллеров на основе эволюционных и классических алгоритмов

Результаты проведенных исследований показали, что из двух рассмотренных в данной работе эволюционных алгоритмов, наибольшую эффективность в определении MPP в условиях частичного затенения СБ показал алгоритм VCPSO, которой и рекомендуется к практическому применению.

В данном разделе работы представлены результаты сравнительной оценки эффективности применения эволюционного алгоритма VCPSO с классическим алгоритмом IC.

На рис.4.12, представлены результаты расчетных экспериментов по оценке эффективности МРРТ контроллеров по схемам 2 и 3 на основе эволюционного алгоритма PSO с классическим МРРТ контроллером IC в условиях частичного затенения.

Из рис. 4.12 видно, что IC ошибся в определении глобальной точки максимальной мощности (GMPP) в case no.3 и 4, а VCPSO верно определил MPP во всех 4 тестовых вариантах. При этом средняя эффективность отслеживания MPP алгоритмом IC оказалась на 26% хуже в сравнении с PSO.

В табл. 4.4 приведены обобщенные результаты оценки эффективности применения алгоритма VCPSO и IC по схемам 2 и 3 по определению GMPP в условиях частичного затенения CБ для 10 рассмотренных вариантов освещенности.



Рисунок 4.12. Результаты моделирования режима ФЭС, построенным на базе алгоритмов VCPSO и IC и при изменении условий освещения СБ, построенных на базе конфигураций PV1

Case No.	VCPS	SO	IC		
	η, %	$t_{\rm MPP}$ , s	η, %	$t_{\rm MPP}$ , s	
1	99.89	0.22	99.77	0.022	
2	99.52	0.24	96.25	0.0023	
3	99.77	0.20	65.49	0.0032	
4	99.98	0.22	34.58	0.0010	
5	99.94	0.20	97.95	0.0032	
6	99.95	0.23	99.68	0.0018	
7	99.86	0.24	92.02	0.0032	
8	99.94	0.26	97.86	0.0017	
9	99.87	0.28	99.32	0.0019	
10	99.93	0.26	97.39	0.0022	
Средняя величина	99.87	0.24	88.01	0.00425	

Таблица 4.4. Эффективность алгоритмов VCPSO и IC при поиске точки максимальной мощности CБ в условиях частичного затенения по схемам 2 и 3

Исходя из этих цифр, VCPSO эффективно отслеживал GMPP во всех тестовых вариантах, а время отслеживания не превышает 0.28 с. IC ошибся в определении глобальной MPP в case no. 3, 4, 5 и 7, при этом средняя эффективность отслеживания алгоритма IC ниже на 12% по сравнению с PSO.

Подробные результаты моделирования (мощность, напряжение, ток и коэффициент заполнения преобразователя) ФЭС по схеме 1, и при изменении условий освещения СБ, построенных на базе конфигураций PV1 приведены на рис. 4.13.



Рисунок 4.13 – Результаты моделирования режима ФЭС, построенным на базе алгоритмов VCPSO и IC и при изменении условий освещения СБ, построенных на базе конфигураций PV1

Анализ результатов, представленных на рис.4.13 показывает, что применение IC алгоритма для поиска точки максимальной мощности, которые применяются в фотоэлектрических станций, обеспечивает контроллерах не надежного отслеживания глобального экстремума вольт-ваттной характеристики, так как алгоритм не смог верно определить GMPP во многих случаях, что приводит к увеличению потерь и снижению производительности электростанции. С другой стороны применение эволюционного алгоритма VCPSO обеспечивает надежное и эффективное отслеживание точки максимальной мощности солнечных батарей в условиях частичного затенения. В табл. 4.5 приведены обобщенные результаты оценки эффективности применения алгоритма VCPSO и IC по схеме 1 по определению GMPP в условиях частичного затенения СБ для 10 рассмотренных вариантов освещенности.

154

Case No.		IC		
	η, %	$t_{\rm MPP}$ , s	η, %	$t_{\rm MPP},{ m s}$
1	100.00	0.046	99.86	0.003
2	99.96	0.045	85.74	0.0012
3	99.88	0.046	99.35	0.005
4	99.91	0.020	99.74	0.007
5	99.82	0.040	79.77	0.004
6	99.29	0.046	85.82	0.003
7	99.79	0.042	99.62	0.008
8	100.00	0.051	92.40	0.005
9	99.73	0.0512	96.88	0.006
10	99.78	0.050	99.13	0.004
Середняя	99.87	0 044	84 87	0 0042
величина	<i>,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,</i>	0.011	07.02	0.0042

Таблица 4.5. Эффективность алгоритмов VCPSO и IC при поиске точки максимальной мощности СБ в условиях частичного затенения по схеме 1

МРРТ контроллер на базе алгоритма IC «ошибся» при определении глобального экстремума в 4 случаях из 10, при этом средняя эффективность отслеживания алгоритма IC снижена на 15% по сравнению с PSO.

#### 4.4. Выводы по разделу

В апробация результате проведенных исследований выполнена предложенной методики выбора параметров компонентов автономной фотоэлектрической станции: преобразователя напряжения и контроллера поиска точки максимальной мощности. В качестве основного инструмента исследований использовалась математическая модель автономной фотоэлектрической станции, на которой было выполнено моделирование ее режимов работы в условиях равномерного освещения и частичного затенения солнечных батарей.

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.

Результаты моделирования показали, что алгоритм VCPSO обеспечивает более высокую точность отслеживания МРР в сравнении с CS алгоритмом, и он может быть рекомендован для практического применения в МРРТ контроллерах ФЭС.

Проведенные исследования показали, что полученные в разделе 3 параметры алгоритма роя частиц для применения в МРРТ контроллерах фотоэлектрических станций обеспечивают надежное и точное определение точки глобального экстремума при сложных формах BBX, характерных для режимов частичного затенения СБ. По результатам моделирования определена модифицированная версия алгоритма PSO, наилучшим образом отвечающая требованиям МРРТ контроллеров фотоэлектрических систем. Анализ полученных результатов показал, что применение классических алгоритмов для поиска точки максимальной мощности, широко применяемых в МРРТ контроллерах фотоэлектрических станций, не обеспечивает надежного отслеживания глобального экстремума вольтваттной характеристики, что приводит к увеличению потерь энергии и снижению С производительности электростанции. другой стороны применение эволюционного алгоритма VCPSO обеспечивает надежное и эффективное отслеживание точки максимальной мощности солнечных батарей в условиях равномерного освещения и частичного затенения.

### 5. ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ОБОРУДОВАНИЯ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

#### 5.1. Объект и задачи исследований

В качестве объекта исследования в данной работе рассматривается HRES со смешанной архитектурой построения [130], часто применяемая для создания систем электроснабжения небольшой мощности, рис. 5.1.



Рисунок 5.1. Схема построения гибридной системы электроснабжения

При таком построении HRES генерирующие установки ВИЭ подключаются через индивидуальные преобразователи к шине постоянного тока (DC), на которой производится регулирование баланса мощности. Шина переменного тока (AC) используется для подключения к ней нагрузки и дизель-генератора (ДГ). Если в АБ имеется достаточный запас энергии, нагрузка получает питание от ФЭУ и ВЭУ через автономный инвертор напряжения. При снижении остаточной емкости АБ ниже установленного предела, система управления формирует управляющий сигнал на включение ДГ, который обеспечивает электроснабжение потребителей, а АБ в этом режиме заряжается от установок ВИЭ.

Задача исследования состояла в разработке методики оптимизации состава оборудования HRES, обеспечивающей ее практическое применение для выбора оборудования энергетических систем, территориально расположенных в любом регионе России. Необходимость создания такой методики отмечается авторами работ [104, 132], посвященных решению аналогичных научно-исследовательских Отличительной особенностью разработанной задач. методики является использование для прогнозирования солнечной радиации оригинальной модели на базе данных Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (National Aeronautics and Space Ad-ministration – NASA) [127]. применение функции обратного распределения Вейбулла И ДЛЯ прогнозирования суточного хода скорости ветра.

#### 5.2. Модели компонентов

HRES Для решения задач оптимизации состава оборудования используются «энергетические» преимущественно упрощенные модели компонентов, однозначно связывающие выходные энергетические ИХ характеристики с внешними факторами и входными воздействиями [92, 134, 93].

Так как режимы работы HRES определяются соотношением мощностей, генерируемой источниками энергии и потребляемой нагрузкой, для их моделирования необходимо сформировать временные ряды климатических данных и графика нагрузки потребителя. Климатические ряды данных формируются на основе географических координат размещения HRES и данных многолетних наблюдений ближайшей метеостанции, для построения графика электрических нагрузок используются имеющиеся данные об объекте электроснабжения.

В настоящей работе для построения временного ряда солнечной радиации G(t) используется комбинированная модель, в которой часть параметров рассчитывается по аналитическим выражениям, а часть определяется с помощью

эмпирических коэффициентов, полученных из базы данных NASA [127] для заданной в расчетах географической точки размещения солнечной батареи (СБ). Суммарная солнечная радиация, поступающая на поверхность СБ, определяется по выражению:

$$G = (G_{\rm H} - G_{\rm DH}) \cdot \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} + G_{\rm DH} \cdot \left[ A_i \cdot \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} + (1 - A_i) \cdot \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) \right] + G_{\rm H} \cdot \rho \cdot \frac{1 - \cos\beta}{2}, \quad (5.1)$$

где  $G_{\rm H}$ ,  $G_{\rm DH}$  – значения суммарной и рассеянной солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность, соответственно, Вт/м<sup>2</sup>;  $\theta$  – угол между направлением потока солнечного излучения к поверхности и нормалью к ней, рад.;  $\theta_z$  – зенитный угол Солнца, рад.;  $\rho$  – альбедо земной поверхности;  $\beta$  – угол наклона приемной площадки к горизонтальной плоскости, рад.;  $A_i$  – показатель анизотропии, который определяется по уравнению:

$$A_{i} = \frac{G_{\rm H} - G_{\rm DH}}{G_{0}},\tag{5.2}$$

где  $G_0=1367$  Вт/м<sup>2</sup> – внеатмосферная радиация на горизонтальную поверхность.

Используемая в настоящих исследованиях модель солнечной радиации подробно описана в работе [127]. Особенностью модели является использование в качестве исходных данных численных значений индекса прозрачности атмосферы и альбедо поверхности, полученных из базы данных NASA. Это позволяет использовать модель 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 построения временного ряда скоростей ветра V(t) экспериментальные данные о скорости ветра аппроксимируются стандартной функцией распределения Вейбулла:

$$F(V) = 1 - e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^{k}},$$
 (5.3)

где c – параметр масштаба, k – параметр формы, F(V) – функция интегральной повторяемости скорости ветра.

С помощью известных методов статистической обработки экспериментальных данных, подробно представленных в [135], предварительно определяются значения коэффициентов *с* и *k* для каждого месяца года, и на их основе формируется временной ряд скоростей ветра для необходимого промежутка времени согласно распределению:

$$V(t) = c \cdot \left[ -\ln\left(1 - F(V)\right) \right]^{\frac{1}{k}}$$
(5.4)

Результаты предварительно проведенных исследований показали, что использование функции обратного распределения Вейбулла (5.4) позволяет значительно повысить достоверность прогнозирования выработки электроэнергии ВЭУ на суточных временных интервалах.

Для построения временного ряда температуры воздуха *T*(*t*) используется модель суточного хода температуры [136], согласно которой:

$$T(t) = \overline{T} + 0.5\Delta T \cdot \cos\left[2\pi \cdot \left(t_{\text{metr}} - t_{\text{max}}\right)/t_{\text{nep}}\right],\tag{5.5}$$

где  $\overline{T}$  – среднесуточная температура воздуха, °C;  $\Delta T$  – суточная амплитуда температуры воздуха, °C;  $t_{nep}$  – период изменения температуры воздуха, ч;  $t_{max}$  – местное время максимума температуры, ч;  $t_{mect}$  – локальное (местное) солнечное время, ч.

Модель суточного хода температуры применима для любого дня года и любого населенного пункта, а ее применение обосновано тем, что изменения температуры в северных широтах имеют явно-выраженный суточный ход, учет которого позволяет повысить точность прогнозирования выработки электроэнергии ФЭУ.

Для построения временного ряда графика электрических нагрузок используется вероятностно-статистическая модель электрических нагрузок децентрализованного потребителя [126]:

$$P_{\text{load}}(t) = \overline{P}_{ik} \cdot k_{Sk} \pm \beta \cdot \sigma(P_{ik}), \qquad (5.6)$$

где  $P_{\text{load}}(t)$  – расчетная активная электрическая нагрузка, Вт;  $\bar{P}_{ik}$  – математическое ожидание активной нагрузки *i*-го часа *k*-го сезона (определяется по статистическим графикам) , Вт;  $k_{\text{Sk}}$  – коэффициент сезонности;  $\sigma(P_{ik})$  – среднее квадратичное отклонение;  $\beta$  – коэффициент надежности расчета (при вероятности 0,975  $\beta$  =2).

Используемая в данной работе вероятностно-статистическая модель позволяет получить достаточно точный детальный прогноз режимов потребления электрической энергии для конкретного объекта электроснабжения со специфическими для него особенностями.

Временные ряды данных формируются на первом этапе исследований, сохраняются в виде .mat файлов, и используются в дальнейшем для моделирования рабочих режимов HRES. Такая организация вычислений позволяет значительно снизить требования к вычислительным ресурсам компьютера, а также обеспечивает возможность решения оптимизационной задачи с различными критериями оптимизации и ограничениями.

В настоящей работе для определения выходной электрической мощности СБ используется следующее выражение [136]:

$$P_{\rm PV} = C_{\rm FF} \cdot N_{\rm FM} \cdot \eta_{\rm conv} \cdot G \cdot \ln(10^6 \cdot G) / T_{\rm FM}, \, \text{Br}$$
(5.7)

где  $N_{\rm FM}$  – число фотоэлектрических модулей (ФМ) в СБ;  $C_{\rm FF}$  – постоянный коэффициент СБ;  $\eta_{\rm conv}$  – КПД преобразователя с контроллером максимальной мощности; G – текущий уровень солнечной радиации, Вт/м<sup>2</sup>;  $T_{\rm FM}$  – текущая температура ФМ, °*K*.

Численные значения коэффициента *C*<sub>FF</sub> определяются по уравнению:

$$C_{\rm FF} = \frac{FF \cdot T_{\rm ref}}{G_{\rm ref}} \cdot \frac{\left[I_{\rm SC} + k_{\rm I}(T_{\rm FM} - T_{\rm ref})\right] \cdot \left[V_{\rm OC} + k_{\rm V}(T_{\rm FM} - T_{\rm ref})\right]}{\ln(10^6 \cdot G_{\rm ref})},$$
(5.8)

где FF – коэффициент заполнения вольт-амперной характеристики (BAX) ФМ;  $T_{ref.}$  $G_{ref}$  – значения температуры и освещенности ФМ при стандартных условиях;  $k_{I}$ ,  $k_{V}$  – температурные коэффициенты тока короткого замыкания и напряжения холостого хода ФМ, соответственно.

Коэффициент заполнения ВАХ ФМ определяется по данным их технической спецификации:

$$FF = I_{\rm MPP} \cdot V_{\rm MPP} / I_{\rm SC} \cdot V_{\rm OC} , \qquad (5.9)$$

где  $I_{\text{MPP}}$ ,  $V_{\text{MPP}}$  – паспортные значения тока и напряжения ФМ в точке максимальной мощности;  $I_{\text{SC}}$ ,  $V_{\text{OC}}$  – паспортные значения тока короткого замыкания и напряжения холостого хода ФМ при стандартных условиях тестирования.

Для определения температуры поверхности ФМ используется эмпирическое выражение, полученное по результатам статистической обработки экспериментальных данных, полученных в условиях эксплуатации кремниевых ФМ в Сибири [136]:

$$T_{FM} = T + 0.0283 \cdot G - 0.0058 \cdot G \cdot V + 0.0005 \cdot G \cdot V^2, \ ^{\circ}C$$
(5.10)

где T – температура окружающего воздуха, °C; V – скорость ветра, м/с; G – текущий уровень солнечной радиации, Вт/м<sup>2</sup>.

Нужно отметить, что многие авторы в своих исследованиях принимают температуру поверхности ФМ равной температуре окружающего воздуха, что обуславливает заметное снижение точности расчетов при определении выходной электрической мощности СБ. Результаты эксплуатации фотоэлектрических станций показывают, что превышение температуры ФМ над температурой внешней среды при высоких значениях солнечной инсоляции может достигать 30 °C, поэтому учет реальной температуры ФМ в эксплуатационных условиях позволяет существенно повысить достоверность результатов при определении выходной мощности СБ  $P_{PV}$ .

Выходная электрическая мощность ВЭУ определяется скоростью ветра, набегающего на ветроколесо, и рабочей характеристикой, заявленной ее производителем. В настоящей работе для определения выходной мощности ВЭУ используется распространенная «кубическая» аппроксимация рабочей характеристики [92, 134]:

$$P_{\rm WT} = \begin{cases} 0 & V < V_{\rm in} \\ \left(\frac{V^3 - V_{\rm in}^3}{V_{\rm rat}^3 - V_{\rm in}^3}\right) \cdot P_{\rm WTrat} & V_{\rm in} < V < V_{\rm rat} \\ P_{\rm WTrat} & V_{\rm rat} < V < V_{\rm up} \\ 0 & V > V_{\rm up} \end{cases}$$
(5.11)

где  $P_{\text{WTrat}}$  – номинальная мощность ветроэнергетической установки, Вт; V – скорость ветра, м/с;  $V_{\text{in}}$  – стартовая скорость ветра, м/с;  $V_{\text{up}}$  – предельная скорость ветра, м/с;  $V_{\text{rat}}$  – номинальная скорость ветра, м/с.

Если высота башни ВЭУ отличается от 10 м, на которой регистрируют параметры ветрового потока большинство метеостанций, для пересчета скорости ветра используется следующее эмпирическое выражение [133]:

$$V_{\rm h} = V_{10} \cdot \ln\left(\frac{h}{z_0}\right) / \ln\left(\frac{10}{z_0}\right),\tag{5.12}$$

где  $V_{10}$  – значение скорости ветра, измеренное на высоте 10 метров;  $V_h$  – значение скорости ветра на уровне ступицы ветроколеса;  $z_0$  – шероховатость земной поверхности.

Математическая модель аккумуляторной батареи описывает два её возможных состояния: фазу заряда и фазу разряда. В фазе заряда АБ уровень заряда (state of charge – SOC, Вт·ч) определяется по уравнению [134]:

$$\operatorname{SOC}(t) = \operatorname{SOC}(t - \Delta t) \cdot (1 - \sigma) + \left[ P_{PV}(t) \cdot \eta_{PV} + P_{WT}(t) \cdot \eta_{WT} - \frac{P_{load}(t)}{\eta_{inv}} \right] \cdot \eta_{ch} \cdot \Delta t$$
 (5.13)

В фазе разряда АБ уровень остаточного заряда определяется следующим образом:

$$SOC(t) = SOC(t - \Delta t) \cdot (1 - \sigma) + \left[ P_{PV}(t) \cdot \eta_{PV} + P_{WT}(t) \cdot \eta_{WT} - \frac{P_{load}(t)}{\eta_{inv}} \right] \cdot \frac{1}{\eta_{dis}} \cdot \Delta t,$$
(5.14)

где  $\sigma$  – скорость саморазряда батареи за время  $\Delta t$ ;  $\eta_{PV}$ ,  $\eta_{WT}$ ,  $\eta_{inv}$  – коэффициенты полезного действия преобразователей ФЭУ, ВЭУ и выходного инвертора, соответственно;  $\eta_{ch}$ ,  $\eta_{dis}$  – эффективность батареи во время фазы заряда и разряда, соответственно.

При определении SOC для устройств хранения энергии необходимо выполнение следующее ограничений:

$$\operatorname{SOC}_{\min} \leq \operatorname{SOC}(t) \leq \operatorname{SOC}_{\max},$$
 (5.15)

где SOC<sub>min</sub> и SOC<sub>max</sub> – минимальное и максимальное значение уровня заряда АБ соответственно, Вт·ч.

Максимальное значение SOC<sub>max</sub>, как правило, соответствует номинальной емкости устройства накопления энергии, нижний предел SOC<sub>min</sub> определяется максимально допустимой глубиной разряда батареи (depth of discharge – DOD, %/100):

$$SOC_{min} = (1 - DOD) \cdot SOC_{max}$$
 (5.16)

Величина DOD зависит от типа AБ и определяет срок службы устройств хранения энергии, так как с увеличением DOD значительно снижается количество рабочих циклов AБ. Кроме того, необходимо учитывать, что аккумуляторные батареи имеют ограничение по максимальному зарядному току (или максимальной зарядной мощности  $P_{ch.max}$ ), допустимое значение которого указывается в технической спецификации конкретной модели AБ.

Характерной особенностью режимов ДГ, работающих в составе изолированных энергетических систем, являются режимы работы на резко переменную нагрузку, что обуславливает изменение в широком диапазоне величины удельного расхода топлива. Для определения удельного расхода топлива при частичных загрузках ДГ в настоящих исследованиях используется следующее эмпирическое выражение, предложенное авторами работы [138]:

$$g = g_{\text{rat}} \cdot \frac{a + b \cdot k_{\text{DG}}}{c \cdot k_{\text{DG}} + 10^{-6}},$$
 (5.17)

где g<sub>rat</sub> – удельный расход топлива при номинальной нагрузке, л/час; *a*, *b*, *c* – постоянные коэффициенты, численные значения которых приняты в соответствии с рекомендациями [138]; *k*<sub>DG</sub> – коэффициент загрузки ДГ.

#### 5.3. Методы исследования

В результате проведенных исследований разработана методика оптимизации состава оборудования HRES, реализованная в виде программного приложения, рис. 5.2 оборудования HRES Оптимизация состава выполняется за три последовательных этапа. На первом этапе расчетов формируются временные ряды климатических данных (солнечной радиации, скорости ветра и температуры воздуха) график электрических нагрузок потребителя И электроэнергии. Временные климатические ряды формируются на основе географических координат размещения HRES и данных многолетних метеорологических наблюдений, для построения графика электрических нагрузок используется вероятностно-статистическая модель электрических нагрузок децентрализованного потребителя [126]. Исходными данными для выполнения первого этапа программы являются данные метеорологических сайтов и базы данных Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA) [127]. В зависимости от требований к детализации расчетов программное приложение позволяет 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.

166



Рисунок 5.2. Упрощенная блок-схема программного приложения для оптимизации состава оборудования гибридных систем электроснабжения

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, который является одним из самых распространенных для решения задач оптимизации HRES. Результаты сравнения алгоритма PSO с другими видами алгоритмов при решении задач оптимизации состава оборудования HRES доказывают его высокую производительность [87, 88, 93, 128], а также надежное функционирование при использовании различных целевых функций и ограничений [129]. Исходными данными для выполнения данного этапа расчетов являются экономические характеристики оборудования и заданные критерии оптимизации и ограничения.

#### 5.4. Целевая функция и ограничения

Разработанное программное приложение позволяет использовать в качестве аргументов целевой функции различные критерии оптимизации, в том числе и несколько критериев одновременно. В данной работе в качестве критерия оптимизации используется показатель стоимости жизненного цикла (life cycle cost – LCC) или общие затраты на энергетическую систему в течение всего ее срока службы:

$$LCC=Cap + Main,$$
 (5.18)

где Сар – общие капитальные затраты на проект; Main – стоимость технического обслуживания.

Так как капитальные вложения в проект производятся единовременно в начале его реализации, а затраты на облуживание в течение всего жизненного цикла, капитальные затраты необходимо привести к виду ежегодных капитальных вложений. Для этого используют коэффициент возврата капитала (capital recovery factor – CRF), который определяется по формуле:

$$CRF = \frac{i \cdot (1+i)^T}{(1+i)^T - 1},$$
 (5.19)

где *i* - процентная ставка; *T* – общий срок службы энергетической системы.

С учетом того, что срок службы отдельных компонентов HRES может быть разным, их необходимо привести к условиям единовременного платежа. В большинстве практических случаев наименьший срок службы из всех компонентов энергетической системы имеют аккумуляторные батареи. Например, если значение жизненного цикла HRES принято равным T=20 лет, а срок службы АБ составляет 5 лет, для определения приведенной стоимости АБ  $C_{\rm BB}$  необходимо использовать следующее выражение:

$$C_{\rm BB} = C_{\rm BB\_0} \cdot \left( 1 + \frac{1}{(1+i)^5} + \frac{1}{(1+i)^{10}} + \frac{1}{(1+i)^{15}} \right), \tag{5.20}$$

где *С*<sub>вв 0</sub> – первоначальная цена АБ.

Для дизель-генераторных установок, срок службы которых определяется по количеству моточасов до капитального ремонта, приведенная стоимость рассчитывается по аналогичной (5.3) формуле после определения их срока службы по уравнению:

$$T_{\rm DG} = \frac{H_{\rm OV}}{H_{\rm F}}, \text{ ner}$$
(5.21)

где  $H_{\rm F}$  – количество часов работы ДГ в год, рассчитанное по результатам моделирования;  $H_{\rm OV}$  – количество моточасов до капитального ремонта, заявленное производителем ДГ.

Для HRES в конфигурации ФЭУ-ВЭУ-АБ-ДГ суммарные приведенные капитальные затраты определяются по уравнению:

$$Cap = CRF \cdot \left( N_{\rm WT} \cdot C_{\rm WT} + N_{\rm PV} \cdot C_{\rm PV} + N_{BB} \cdot C_{\rm BB} + C_{\rm DG} + C_{\rm inv} \right), \tag{5.22}$$

где  $N_{WT}$ ,  $C_{WT}$  – количество и стоимость ВЭУ;  $N_{PV}$ ,  $C_{PV}$  – количество и стоимость ФЭУ;  $N_{BB}$ ,  $C_{BB}$  – количество и приведенная стоимость АБ;  $C_{DG}$  –приведенная стоимость ДГ;  $C_{inv}$  – приведенная стоимость инвертора.

Пренебрегая затратами на обслуживание инвертора, суммарные затраты на техническое обслуживание HRES определяются по уравнению:

$$Main = N_{\rm WT} \cdot M_{\rm WT} + N_{\rm PV} \cdot M_{\rm PV} + N_{\rm BB} \cdot M_{\rm BB} + M_{\rm DG} + M_{\rm fuel}, \qquad (5.23)$$

где  $M_{\rm WT}$ ,  $M_{\rm PV}$ ,  $M_{\rm BB}$ ,  $M_{\rm DG}$  – ежегодные затраты на техническое обслуживание ВЭУ, ФЭУ, АБ и ДГ;  $M_{\rm fuel}$  – затраты на дизельное топливо, рассчитанные по результатам моделирования.

В качестве технических ограничений используются требования к надежности, которые в данной работе задаются в виде численного значения требуемого показателя вероятности потери питания (loss of power supply probability – LPSP\*). Для обеспечения требуемого уровня надежности HRES должно выполняться следующее условие:

$$LPSP \le LPSP^*, \tag{5.24}$$

где LPSP – расчетная величина вероятности потери питания, которая определяется в результате моделирования режимов HRES по уравнению:

$$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^{T} LPS(t)}{\sum_{t=1}^{T} P_{load}(t)},$$
(5.25)

где LPS(*t*) соответствует энергии, потребленной нагрузкой на временных интервалах, в которых остаточная емкость АБ ниже минимально допустимого значения:

$$LPS(t) = \frac{P_{load}(t)}{\eta_{inv}} - P_{PV}(t) - P_{WT}(t) - |SOC(t-1) \cdot (1-\sigma) - SOC_{min}| \cdot \eta_{ch}$$
(5.26)

Горизонт моделирования режимов HRES в данной работе принят в один год, соответственно в уравнении (5.25) *Т*=8760.

Для оптимизационной задачи ограничениями также являются минимальное и максимальное количество ФМ в СБ  $N_{PV}$ , количество ветроэнергетических установок  $N_{WT}$ , число аккумуляторов в аккумуляторной батарее  $N_{BB}$ . Для конфигурации HRES с ДГ минимальное количество энергетического оборудования принимается равным нулю, для HRES без гарантированного источника питания минимальная емкость АБ  $Q_{BB}$  (кВт·ч) определяется с учетом требований к автономности, которая выражается в числе часов питания  $T_{BB}$  (час) потребителей от АБ при отсутствии генерации от возобновляемых источников, допустимой глубины разряда DOD (%) батарей, общей эффективности системы хранения энергии:

$$Q_{\rm BB} \ge \frac{E_{\rm L} \cdot T_{\rm BB}}{24 \cdot \text{DOD} \cdot \eta_{\rm ch} \cdot \eta_{\rm inv}}$$
(5.27)

где *E*<sub>L</sub> – значение среднесуточной величины энергии, потребляемой нагрузкой в месяц года с самым высоким значением коэффициента сезонности *k*<sub>Sk</sub>.

#### 5.5. Результаты оптимизации

Для апробации предлагаемой методики рассмотрен пример выбора состава оборудования HRES, предназначенной для электроснабжения изолированного потребителя с максимальной мощностью нагрузки 10 кВт, территориально расположенного в районе г. Владивостока (43° 6' с.ш., 135° 42' в.д.). Сформированные временные климатические ряды и годовой график нагрузки потребителя представлены на рис. 5.3.



Рисунок 5.3. Временные ряды климатических данных и график нагрузки потребителя

В данной работе используются численные значения и законы изменения коэффициентов инерции и ускорения PSO, установленные в работе [132]. Число частиц роя и максимальное число итераций алгоритма выбираются в соответствии

с размерностью решаемой задачи. Предварительно проведенные вычислительные эксперименты показали, что для рассматриваемого ниже примера рациональными значениями являются: *N*=80, *k*<sub>max</sub> =100.

Для построения временного ряда солнечной радиации, приходящей на горизонтальную поверхность в г.Владивосток, использовались данные NASA за 22х летний период наблюдений, временные ряды скорости ветра и температуры воздуха построены по данным сайта «Расписание погоды» [131] за 15-ти летний период наблюдений по метеостанции № 31960. График электрических нагрузок построен на основе типового графика нагрузок коммунально-бытового потребителя, коэффициент сезонности изменяется от 0,7 в летние месяцы до 1 в зимние месяцы года. На каждом из графиков, представленных на рис. 5.3, наложены суточные тренды изменения соответствующих параметров для дня 9 мая.

В качестве основного энергетического оборудования HRES использовались следующие виды компонентов: фотоэлектрические модули поликристаллического типа Kyocera Solar KD320GX-LPB, ветроэнергетическая установка AeolosH2KW, аккумуляторы HOPPECKE 8 OPzS 800, дизель-генераторная установка 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 работ [87, 89, 94]. Основные технико-экономические характеристики компонентов приняты в табл. 5.1.

Приведенные в табл.5.1 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 DG составляет 3,67 литра, стоимость топлива принята равной \$0,67/литр. Допустимая глубина разряда аккумуляторных батарей принята равной DOD=70%, максимальная зарядная мощность  $P_{ch,max} = 0,2 \cdot SOC_{max}$ .

	Оборудование					
	Kyocera					
Показатель	Solar	Aeolos	HOPPECKE	Perkins	Victron	
	KD320GX-	H2KW	80PzS 800	403D-15G	Phoenix3000	
	LPB					
Номинальная мощность	320 Bt	2 кВт	1 6 кВт·ч	12 кВт	12 кВт	
(емкость)	520 51		1,0 101 1			
Капитальные затраты,	800	4200	360	10000	8600	
долл.США	000	1200	500	10000	0000	
Затраты на обслуживание,	8	170	3.6	0.33/час	0	
долл.США	0	170	2,0	0,007 140	v	
Срок службы	20 лет	20 лет	5 лет	15000 час	10 лет	

Искомыми 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. 5.2 представлены результаты решения задач оптимизации состава оборудования HRES с гарантированным источником питания в виде ДГ.

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. Структура затрат на лучшую конфигурацию HRES с DG показана на рис. 5.4.

Таблица 5.2 Оптимальный состав оборудования HRES с гарантированным источником питания

Конфигурация НВЕS	Количество единиц оборудования				LCC, долл.
IIKES	$N_{\rm PV}$	$N_{\rm WT}$	N <sub>BB</sub>	$N_{\rm DG}$	CIIIA
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

Лучший вариант на базе ФЭУ-ВЭУ-АБ-ДГ



Рисунок 5.4. Структура общих затрат на гибридную систему электроснабжения

Важными достоинствами ДГ-ФЭУ-ВЭУ-АБ конфигурации HRES являются высокая надежность и хорошие экологические характеристики, обеспечиваемые на

счет значительного сокращения часов работы ДГ: расчетное число моточасов ДГ в данной конфигурации составляет 742 часа в год, при общем расходе топлива 1123 литра. Временные диаграммы рабочих режимов оборудования HRES на 48-часовом временном интервале (для дней 22-23 февраля), построенные по результатам моделирования, показаны на рис. 5.5. Для наглядного отображения всех переменных на одном графике для показателя SOC использовался масштабирующий коэффициент <sup>1</sup>/<sub>4</sub>.

Анализ временных диаграмм, представленных на рис. 5.5, показывает, что режимы работы HRES полностью соответствуют принципам управления, описанным выше. Возможность построения и изучения временных диаграмм для произвольных интервалов времени является важным достоинством предлагаемой методики. Применение данной опции позволяет использовать разработанное программное обеспечение не только для оптимизации состава оборудования HRES произвольной конфигурации, но и разработки эффективных алгоритмов контроля и управления режимами.



## Рисунок 5.5. Временные диаграммы режимов работы гибридной системы электроснабжения

Результаты решения задач оптимизации состава оборудования HRES без ДГ представлены в табл. 5.3. Результаты получены для различных значений показателя вероятности потери питания LPSP\*.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что конфигурации HRES без гарантированного источника питания являются конкурентоспособными по величине LCC с конфигурациями HRES, представленными в табл. 5.2. Соответственно, данные конфигурации являются перспективными для применения в энергетических системах, предназначенных для электроснабжения потребителей, не требующих высокого уровня надежности.

# Таблица 5.3 Оптимальный состав оборудования HRES без гарантированного источника питания

	Количество единиц				LCC,
LPSP*, %	об	долл.			
	$N_{\rm PV}$	Nwt	N <sub>BB</sub>	$N_{\rm DG}$	США
2	51	9	39	0	14146
1	53	9	42	0	14588
0	79	4	63	0	15846

#### 5.6. Выводы по разделу

В результате исследований разработано проведенных программное оборудования приложение оптимизации состава гибридных для электроэнергетических систем С возобновляемыми источниками энергии. Приложение может быть использовано для выбора оптимального состава оборудования HRES различных конфигураций, территориально расположенных в любом регионе России, в том числе и в районах, для которых отсутствуют наблюдений. В результаты актинометрических отличие OT 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.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными результатами диссертационной работы являются:

- Выполнен сравнительный анализ способов повышения эффективности фотоэлектрических станций и методов отслеживания точки максимальной мощности солнечных батарей в условиях равномерного освещения и частичного затенения.
- 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.
- Предложен, теоретически обоснован и подтвержден результатами моделирования метод определения оптимальных значений времени выборки для цифровых МРРТ контроллеров фотоэлектрических станций, обеспечивающий их максимальное быстродействие.
- Определены оптимальные параметры алгоритма роя частиц для применения в МРРТ 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.
| ВИЭ   | _ | возобновляемые источники энергии;                          |
|-------|---|--|
| ФЭС   | _ | фотоэлектрическая станция;                                 |
| СЭС   | — | солнечные электростанции;                                  |
| ДЭС   | — | дизельная электростанция;                                  |
| СБ    | — | солнечная батарея;   |
| MPPT  | — | Maximum power point tracking;                              |
| PSO   | — | Particle swarm optimization;                               |
| CS    | — | Cuckoo search;   |
| ГСЭС  | — | гибридные системы электроснабжения;                        |
| ФЭУ   | — | фотоэлектрические установки;                               |
| ВЭУ   | — | ветроэнергетические установки;                             |
| АБ    | — | аккумуляторная батарея;                                    |
| TЭ    | — | топливные элементы;  |
| ДГ    | — | дизель-генераторные установки;                             |
| LPSP  | — | loss of power supply probability;                          |
| LLS   | — | loss of load probability;                                  |
| EENS  | — | expected energy not supplied;                              |
| LCC   | _ | life cycle cost;   |
| КПД   | _ | коэффициент полезного действия;                            |
| СЭ    | _ | солнечный элемент;   |
| PWM   | _ | широтно-импульсная модуляция (pulse width modulation);     |
| CCM   | — | режим непрерывных токов;                                   |
| ΦМ    | — | фотоэлектрическая модель;                                  |
| BBX   | — | вольт-ваттные характеристики;                              |
| BAX   | — | вольт-амперные характеристики;                             |
| P&O   | — | метод возмущения и наблюдения;                             |
| IC    | — | метод возрастающей проводимости;                           |
| PSC   | — | условие частичного затенения (partial shading conditions); |
| VCPSO | — | PSO с переменными значениями коэффициентов инерции и       |
|       |   | ускорения;   |
| CFPSO | — | сходимость алгоритма обеспечивается за счет использования  |
|       |   | специального коэффициента сужения;                         |
| HRES  | — | hybrid renewable energy systems;                           |
| СЭ    | — | солнечный элемент;   |
| NASA  | — | национальное управление по воздухоплаванию и               |
|       |   | исследованию космического пространства (англ. National     |
|       |   | Aeronautics and Space Administration);                     |
| CRF   | _ | capital recovery factor;                                   |

# СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

Сар – общие капитальные затраты на проект;

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1. Обухов С. Г., Плотников И. А., Ибрагим А., Масолов В. Г. Двухконтурный гибридных накопитель энергии для энергетических систем С возобновляемыми источниками энергии Известия // Томского политехнического университета. Geo Assets Engineering. - 2020 - Т. 331 - №. 1. - C. 64-76.
- 2. 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
- Alattar, A. A., Sameh S., Metwally H. M., Ibrahim A., Aboelsaud R., Tolba M. A., El-Rifaie A. M. Performance Enhancement of Micro Grid System with SMES Storage System Based on Mine Blast Optimization Algorithm // Energies. - 2019 -T. 12 - №. 16. - C. 1-22.
- 4. International Energy Outlook. 2019. U.S. Energy Information Administration EIA—Independent Statistics and Analysis / Electricity-Energy Information. 2019.
- 5. Jäger-Waldau A. PV Status Report 2019 / Luxembourg: Office of the European Union, 2019. 88 p.
- 6. Постановление Правительства РФ от 28 мая 2013 г. № 449 «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности» // Опубликовано на официальном интернет-портале правовой информации <u>http://www.pravo.gov.ru.</u>
- 7. Постановление Правительства РФ от 23 января 2015 г. № 47 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам стимулирования использования возобновляемых источников энергии на розничных рынках электрической энергии» // Опубликовано на официальном интернет-портале правовой информации <u>http://www.pravo.gov.ru.</u>
- План мероприятий по стимулированию развития генерирующих объектов на основе возобновляемых источников энергии с установленной мощностью до 15 кВт от 19 июля 2017 г. за подписью А. Дворковича [Электронный ресурс]. URL:<u>http://static.government.ru/media/files/D7T1wAHJ0E8vEWst5MYzr5DOnh HFA3To.pdf</u> (30.11.2019).
- 9. Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Институт энергетики, <u>https://energy.hse.ru/distributed</u>
- Obukhov S., Ibrahim A., Diab A. A. Z., Al-Sumaiti A. S., and 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. 20. C. 1–28, 2020.

- 11.Системный Оператор Единой Энергетической Системы. Информационный<br/>обзор «Единая энергетическая система России: промежуточные итоги»,<br/>Февраль 2018. [Электронный ресурс]. URL: <a href="https://so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/ups-review/2018/ups\_review\_0218.pdf">https://so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/ups-review/2018/ups\_review\_0218.pdf</a><br/>(30.11.2019).
- 12.Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28 июля 2015 г. № 1472-р [Электронный ресурс]. Режим доступа: <u>http://static.government.ru/media/files/goomAd8bkYkAzjAwAOpRJ5pt2mjqbvi</u> <u>W.pdf</u>
- 13. Off-grid Renewable Energy Solutions: Global and Regional Status and Trends / IRENA, 2018, Abu Dhabi
- Указ «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.kremlin.ru/events/president/news/57425. – (Дата обращения: 22.09.2019).
- 15.О проекте плана по модернизации неэффективной дизельной, мазутной и угольной генерации в труднодоступных регионах. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://government.ru/orders/selection/401/35150/. (Дата обращения: 22.09.2019).
- 16.Солнечные концентраторы. Виды и особенности. Применение. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <u>https://electrosam.ru/glavnaja/jelektroobustrojstvo/jelektroobogrev/solnechnyekontsentratory/</u>, (дата обращения: 20.01.2020г).
- 17.Обухов, Сергей Геннадьевич. Выбор параметров и анализ эффективности применения систем слежения за Солнцем [Электронный ресурс] / С. Г. Обухов, И. А. Плотников // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. Инжиниринг георесурсов / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). 2018. Т. 329, № 10. С. 95-106.
- 18.Lee J.F., Rahim N.A. Performance Comparison of Dual Axis Solar Tracker vs Static Solar System in Malaysia // IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CEAT). – 2013. C. 102–107.
- 19.Ribeiro D.B.S., Demetino G.G., Pepe I.M. Solar Trackers: Worldwide Map of Performances // 22nd International Congress of Mechanical Engineering. – Ribeirno Preto, Brazil, 2013. – C. 5521–5530.
- 20.Солнечный трекер. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <u>https://alter220.ru/solnce/treker.html</u>, (дата обращения: 20.01.2020г).
- 21.МРРТ контроллеры: Что такое МРРТ контроллеры. [Электронный ресурс] // Электрон. текстовые дан. – 2016.– Режим доступа: <u>http://www.solarhome.ru/ru/control/mppt</u>, свободный.

- 22.Первый в России тест солнечных контроллеров премиум-класса. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <u>http://www.invertor.ru/mppt.php</u>, свободный.
- 23.Shebani M.M., Iqbal T., Quaicoe J.E. Comparing bisection numerical algorithm with fractional short circuit current and open circuit voltage methods for MPPT photovoltaic systems / In: Electrical Power and Energy Conference (EPEC). IEEE. –2017. C. 1–5.
- 24. Loukriz A., Haddadi M., Messalti S. Simulation and experimental design of a new advanced variable step size incremental conductance MPPT algorithm for PV systems // ISA Trans. -2017. C. 30-38.
- 25.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
- 26.Обухов С.Г., Плотников И.А. Моделирование и исследование режимов работы солнечной фотоэлектрической станции с контроллером максимальной мощности // Альтернативная энергетика и экология: международный научный журнал. 2015. № 13-14. С. 38–50.
- 27.Kwan T.H., Wu X. High performance P&O based lock-on mechanism MPPT algorithm with smooth tracking // Solar Energy. –2017. C. 816–828.
- 28.Kamarzaman N. A., Tan C. W. A comprehensive review of maximum power point tracking algorithms for photovoltaic systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. T. 37. C. 585–598.
- 29. Obukhov S.G., Plotnikov I.A., Sheryazov S.K. Methods of effective use of solar power system / Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM): Proceedings of 2nd International Conference, Chelyabinsk, May 19-20, 2016 / South Ural State University. – New York: IEEE, 2016
- 30.Husain M. A., Tariq A., Hameed S., Arif M. S. B., Jain A. Comparative assessment of maximum power point tracking procedures for photovoltaic system // Green Energy & Environment. 2017. T. 2. C. 5–17.
- 31.Ji Y-H, Jung D-Y, Kim J-G, Kim J-H, Lee T-W, Won C-Y. A real maximum power point tracking method for mismatching compensation in PV array under partially shaded conditions // IEEE Trans Power Electron.2011. T. 26(4). C. 1001–1009
- 32.Silvestre S, Chouder. A. Effects of shadowing on photovoltaic module performance // Prog Photovoltaics Res Appl. 2008. T. 16, № 2. C. 141–149.
- 33.EltamalyAM(2015) Performance of smart maximum power point tracker under partial shading conditions of photovoltaic systems // J Renew Sustain Energy T. 7, № 4. C. 043141

- 34.Motahhir, S., El Ghzizal, A., Sebti, S., & Derouich, A. (2016). Shading effect to energy withdrawn from the photovoltaic panel and implementation of DMPPT using C language // International review of automatic control, T. 9, № 2. C. 88-94.
- 35.Duong MQ, Sava GN, Ionescu G, Necula H, Leva S, MussettaM(2017) Optimal bypass diode configuration for PV arrays under shading influence / In: 2017 IEEE international conference on environment and electrical engineering and 2017 IEEE industrial and commercial power systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe). IEEE, C. 1–5.
- 36.Patel H, Agarwal V. MATLAB-based modeling to study the effects of partial shading on PV array characteristics // IEEE Trans Energy Convers. 2008. T. 23(1). C. 302–310.
- 37.Chin CS., Neelakantan P., Yang SS., Chua BL., Tze Kin Teo K. Effect of partially shaded conditions on photovoltaic array'smaximum power point tracking // Int J Simul–Syst SciTechnol. 2011. T. 12, № 3.
- 38.Eltamaly AM. Performance of MPPT techniques of photovoltaic systems under normal and partial shading conditions. In: Advances in renewable energies and power technologies // Elsevier. 2018. C. 115–161.
- 39.Singh PO. Modeling of photovoltaic arrays under shading patterns with reconfigurable switching and bypass diodes // Theses and dissertations. 2011.
- 40.Duong MQ, Sava GN, Ionescu G, Necula H, Leva S, MussettaM Optimal bypass diode configuration for PV arrays under shading influence / In: 2017 IEEE international conference on environment and electrical engineering and 2017 IEEE industrial and commercial power systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe). IEEE, C. 1–5.
- 41.Seyedmahmoudian M., Horan B., KokSoon T., Rahmani R., MuangThan Oo A., Mekhilef S., Stojcevski A. State of the art artificial intelligence-based MPPT techniques for mitigating partial shading effects on PV systems – A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. T. 64. C. 435–455.
- 42.Faiza Belhachat, Cherif Larbes. Comprehensive review on global maximum power point tracking techniques for PV systems subjected to partial shading conditions // Solar Energy. –2019. C. 476–500.
- 43.Shi J-Y., Xue F., Qin Z-J., Zhang W., Ling L-T., Yang T. Improved Global Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic System via Cuckoo Search under Partial Shaded Conditions // Journal of Power Electronics, T. 16, № 1, C. 287-296.
- 44.Huang Y.-P., Chen X., Ye C.-E. A Hybrid Maximum Power Point Tracking Approach for Photovoltaic Systems under Partial Shading Conditions Using a Modified Genetic Algorithm and the Firefly Algorithm // Int. J. Photoenergy. 2018. C. 1–13.
- 45.El-Helw H.M., Magdy A., Marei M.I. A Hybrid Maximum Power Point Tracking Technique for Partially Shaded Photovoltaic Arrays // IEEE Access. 2017.

- 46.Na W., Chen P., Kim J. An Improvement of a Fuzzy Logic-Controlled Maximum Power Point Tracking Algorithm for Photovoltic Applications // Appl. Sci. 2017. T. 7. doi:10.3390/app7040326
- 47.Karamia N., Moubayedb N., Outbibc R. General review and classification of different MPPT Techniques // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. T. 68. C. 1–18.
- 48.Hu, Y., Liu, K., Zhang, X., Su, L., Ngai, E.W.T., Liu, M. Application of evolutionary computation for rule discovery in stock algorithmic trading: a literature review // Appl. Soft Comput, 2015.
- 49.Ishibuchi, H., Tsukamoto, N., Nojima, Y. Evolutionary many-objective optimization: a short review // in: 2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2008, C. 2419-2426.
- 50.A.M. Sharaf, A.A.A. El-Gammal, A novel particle swarm optimization PSO-based dynamic green power filter-compensator for radial distribution systems // Int. J. Power Eng. Green Technol. 1 (1) (2010). C. 11–37.
- 51.Amini M.H., et al., Simultaneous allocation of electric vehicles' parking lots and distributed renewable resources / in smart power distribution networks, Sustain. Cities Soc. 2017. C. 332–342.
- 52.Abbas G., et al., Solution of an Economic Dispatch Problem Through Particle Swarm Optimization: A Detailed Survey—Part II // IEEE Access. 2017. C. 24426– 24445.
- 53.Zhixiong L., Shaomei W. Hybrid Particle Swarm Optimization for Permutation Flow Shop Scheduling / Intelligent Control and Automation, 2006. WCICA 2006. The Sixth World Congress on, 2006, C. 3245–3249.
- 54.AlRashidi M.R., El-Hawary M.E. Hybrid particle swarm optimization approach for solving the discrete OPF problem considering the valve loading effects // IEEE Trans. Power Syst. 2007. T. 22. C. 2030–2038.
- 55.Zimmerman R.D., Murillo-Sa'nchez C.E., Thomas R.J., MATPOWER: steadystate operations, planning and analysis tools for power systems research and education // IEEE Trans. Power Syst. 2011. T.26, № 1. C. 12–19.
- 56.Abdelaziz A.Y., Ali E.S. Cuckoo Search algorithm based load frequency controller design for nonlinear interconnected power system // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2015. T. 73. C. 632-643.
- 57.Abdelaziz A.Y., Badr M. A., Algabalawy M. A. Optimal Multi-Criteria Design of Hybrid Power Generation Systems Using Cuckoo Search and Firefly Algorithms / Seventeenth International Middle East Power Systems Conference, December 15-17, 2015 (MEPCON'15)
- 58.Yazan M. Alsmadi, Alaa M. Abdel-hamed, Abo Eleyoun Ellissy, Amged S. El-Wakeel, Almoataz Y. Abdelaziz, Vadim Utkin, Ali Arshad Uppal, Optimal configuration and energy management scheme of an isolated micro-grid using

Cuckoo search optimization algorithm // Journal of the Franklin Institute, T. 356, 8. 2019, C. 4191-4214.

- 59. 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
- 60.Rezk H., Fathy A., Abdelaziz A.Y. A comparison of different global MPPT techniques based on meta-heuristic algorithms for photovoltaic system subjected to partial shading conditions // Renew. Sustain. Energy Rev. 2017. Vol. 74. PP. 377-386.
- 61.Liu Y-H., Huang S-C., Huang J-W., Liang W-C. A Particle Swarm Optimization-Based Maximum Power Point Tracking Algorithm for PV Systems Operating Under Partially Shaded Conditions // IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, T. 27, № 4, DECEMBER 2012, C.1027-1035
- 62.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.
- 63.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 - T. 55, №. 6. C. 367-375. doi: 10.3103/S0003701X19060045
- 64.Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization. Proc. Int. Conf. Neural Networks, 1995, T. 4, C. 1942–1948.
- 65.Shi Y., Eberhart R. A modified particle swarm optimizer. IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. 1998. C. 69–73.
- 66.Huynh D.C., Nguyen T.M., Dunnigan M.W., Mueller M.A. Global MPPT of Solar PV Modules using a Dynamic PSO Algorithm under Partial Shading Conditions / 2013 IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CEAT), C. 134-139.
- 67.Sundareswaran K., Vignesh kumar V., Palani S. Application of a combined particle swarm optimization and perturb and observe method for MPPT in PV systems under partial shading conditions // Renewable Energy. 2015. T. 75. C. 308-317.
- 68.Abdulkadir M., Yatim A.H.M., Yusuf S.T. An Improved PSO-Based MPPT Control Strategy for Photovoltaic Systems // International Journal of Photoenergy, T. 2014, Article ID 818232, C.11.
- 69.Dileep G., Singh S.N. An improved particle swarm optimization based maximum power point tracking algorithm for PV system operating under partial shading conditions // Sol. Energy. 2017. C. 1006–1015.
- 70.G. Shankar G., V. Mukherjee V. MPP detection of a partially shaded PV array by continuous GA and hybrid PSO // Ain Shams Engineering Journal. 2015. T. 6, № 2,. C. 471-479

- 71.Clerc M., Kennedy J. The Particle Swarm Explosion, Stability, and Convergence in a Multidimensional Complex Space // IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, VOL. 6, NO. 1, FEBRUARY 2002.
- 72.Yang X.S., Deb S. Cuckoo Search via Lévy flights// Nat. Biol. Inspired Comput. 2009. NaBIC 2009. World Congr.
- 73.Reynolds A.M., Frye M.A. Free-flight odor tracking in Drosophila is consistent with an optimal intermittent scale-free search // PLoS One. 2007.
- 74. Yang X.S., Deb S. Cuckoo search via Levy flights // 2009 World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing, NABIC 2009 Proceedings. 2009.
- 75. Chaieb H., Sakly A. A novel MPPT method for photovoltaic application under partial shaded conditions // Solar Energy. 2018. T. 159. C. 291–299.
- 76.Ishaque K., Salam Z., Amjad M., Mekhilef S. An Improved Particle Swarm Optimization (PSO)–Based MPPT for PV With Reduced Steady-State Oscillation // IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS. 2012, T. 27, № 8. C. 3627-3638.
- 77.Mirhassani S.M., Golroodbari S.Z.M., Golroodbari S.M.M., Mekhilef S. An improved particle swarm optimization based maximum power point tracking strategy with variable sampling time // Electrical Power and Energy Systems. 2015. C. 64761–770.
- 78.Sudhakar Babu T., Rajasekar N., Sangeetha K. Modified Particle Swarm Optimization technique based Maximum Power Point Tracking for uniform and under partial shading condition // Applied Soft Computing . 2015. T. 34. C. 613– 624.
- 79. Tobón A., Peláez-Restrepo J., Villegas-Ceballos J.P., Serna-Garcés S.I., Herrera J., Ibeas A. Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Panels by Using Improved Pattern Search Methods // Energies. 2017. T.10. C. 1316.
- 80.Mao M., Zhang L., Duan Q., Oghorada O.J.K, Duan P., Hu B. A Two-Stage Particle Swarm Optimization Algorithm for MPPT of Partially Shaded PV Arrays // International Journal of Green Energy, 2017. T. 14, № 8. C. 694–702.
- 81.Sarvi M, Ahmadi S, Abdi S. A PSO-based maximum power point tracking for Photovoltaic systems under environmental and partially shaded conditions // Prog Photovolt: Res Appl. 2015. T. 23. № 2.
- 82.Ahmed J, Salam Z A maximum power point tracking (MPPT) for PV system using Cuckoo search with partial shading capability // Appl Energy. 2014. T. 119.C. 118– 130.
- 83.Родзин С.И., Курейчик В.В. Теоретические вопросы и современные проблемы развития когнитивных биоинспирированных алгоритмов оптимизации (обзор) // Кибернетика и программирование. 2017. № 3. С. 51 79.

- 84.Сайт Национального исследова-тельского университета «Высшая школа экономики». https://energy.hse.ru/distributed (дата обращения: 20.06.2020).
- 85.Люкайтис В.Ю., Глушков С.Ю. Автономные энергокомплексы, гибридные конструкции с применением возобновляемых источников энергии // Силовое и энергетическое оборудование. Автономные системы. 2019. Т. 2, вып. 2. –С. 111–120. DOI: 10.32464/2618-8716-2019-2-2-111-120.
- 86.Askarzadeh A., Coelho L.S. A novel framework for optimization of a grid independent hybrid renewable energy system: A case study of Iran // Solar Energy. 2015. T.112. C. 383–396. DOI: 10.1016/j.solener.2014.12.013
- 87.Maleki A., Pourfayaz F. Optimal sizing of autonomous hybrid photovoltaic/wind/battery power system with LPSP technology by using evolutionary algorithms // Solar Energy. 2015. T. 115. C. 471–483. DOI: 10.1016/j.solener.2015.03.004
- 88. Sanchez V.M., Chavez-Ramirez A.U., Duron-Torres S.M., Hernandez J., Arriaga L.G, Ramirez J.M.Techno-economical optimization based on swarm intelligence algorithm for a stand-alone wind-photovoltaic-hydrogen power system at southeast region of Mexico // International Journal of Hydrogen Energy.– 2014. T. 39, № 29. C. 16646–16665. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.06.034
- 89.Mamaghani A.H., Escandon S.A.A., Najafi B., Shirazi A., Rinald F. Technoeconomic feasibility of photovoltaic, wind, diesel and hybrid electrification systems for off-grid rural electrification in Colombia // Renewable Energy. – 2016. – T. 97. – C. 293–305. DOI: 10.1016/j.renene.2016.05.086
- 90. Odou O.D.T., Bhandari R., Adamou R. Hybrid off-grid renewable power system for sustainable rural electrification in Benin // Renewable Energy. – 2020. – T. 145. – C. 1266–1279. DOI: 10.1016/j.renene.2019.06.032
- 91.Sanajaoba S., Fernandez E. Maiden application of Cuckoo Search algorithm for optimal sizing of a remote hybrid renewable energy System // Renewable Energy. - 2016. - T. 96. - C. 1-10. DOI: 10.1016/j.renene.2016.04.069
- 92.Xu X., Hu W., Cao D., Huang Q., Chen C., Chen Z. Optimized sizing of a standalone PV-wind-hydropower station with pumped-storage installation hybrid energy system // Renewable Energy. 2020. T. 147, № 1. C. 1418–1431. DOI: 10.1016/j.renene.2019.09.099
- 93.Rouhani A. A., Kord H., Mehrabi M. Comprehensive Method for Optimum Sizing of Hybrid Energy Systems using Intelligence Evolutionary Algorithms // Indian Journal of Science and Technology. 2013. T. 6, №. 6. C. 4702–4712. DOI: 10.17485/ijst/2013/v6i6/33924
- 94.Maleki A. Modeling and optimum design of an off-grid PV/WT/FC/diesel hybrid system considering different fuel prices // International Journal of Low-Carbon Technologies. 2018. –T. 13, № 2. C. 140–147. DOI: 10.1093/ijlct/cty006

- 95.Hamanah W.M., Abido M.A., Alhems L.M. Optimum Sizing of Hybrid PV, Wind, Battery and Diesel System Using Lightning Search Algorithm // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2020. – T. 45. – C. 1871–1883. DOI: 10.1007/s13369-019-04292-w
- 96.Cho J.H., Chun M.G., Hong W.P. Structure Optimization of Stand-Alone Renewable Power Systems Based on Multi Object Function // Energies. – 2016. – T. 9, №. 8. – C. 1–19. DOI: 10.3390/en9080649
- 97.Lu J., Wang W., Zhang Y., Cheng S. Multi-Objective Optimal Design of Stand-Alone Hybrid Energy System Using Entropy Weight Method Based on HOMER // Energies. – 2017. – T. 10, №. 10. – C. 1–17. DOI: 10.3390/en10101664
- 98.Sharafi M., ELMekkawy T.Y. Multi-objective optimal design of hybrid renewable energy systems using PSO-simulation based approach // Renewable Energy. – 2014. – T. 68. – C. 67–79. DOI: 10.1016/j.renene.2014.01.011
- 99.Wang R., Xiong J., He M., Gao L., Wang L. Multi-objective optimal design of hybrid renewable energy system under multiple scenarios // Renewable Energy. 2020. Vol. 151. P. 226–237. DOI: 10.1016/j.renene.2019.11.015
- 100. Singh S., Singh M., Kaushik S.C. A review on optimization techniques for sizing of solar-wind hybrid energy systems // International Journal of Green Energy. – 2016. – T. 13, №. 15. – C. 1564–1578. DOI: 10.1080/15435075.2016.1207079
- 101.Saharia B.J., Brahma H., Sarmah N. A review of algorithms for control and optimization for energy management of hybrid renewable energy systems // Journal of Renewable and Sustainable Energy. 2018. T. 10(053502). C. 1–33. DOI: 10.1063/1.5032146
- 102. Singh S.S., Fernandez E. Modeling, size optimization and sensitivity analysis of a remote hybrid renewable energy system // Energy. 2018. Vol. 143. P. 719–731. DOI: 10.1016/j.energy.2017.11.053
  - 103.Sinha S., Chandel S.S. Review of software tools for hybrid renewable energy systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 32. P. 192–205. DOI: 10.1016/j.rser.2014.01.035
- 104. Елистратов В.В. Автономное энергоснабжение территорий России энергокомплек-сами на базе возобновляемых источников энергии // Энергетический вестник. 2016. №21. С.42-49.
- 105. Nayak B., Mohapatra A., Mohanty K.B. Selection criteria of dc-dc converter and control variable for MPPT of PV system utilized in heating and cooking applications // Cogent Engineering. 2017. T. 4. C. 1–16.
- 106. Rezk H. et al. Design and Hardware Implementation of New Adaptive Fuzzy Logic-Based MPPT Control Method for Photovoltaic Applications // IEEE Access. 2019.
- 107.Khatib T., Ibrahim I.A., Mohamed A. A review on sizing methodologies of photovoltaic array and storage battery in a standalone photovoltaic system // Energy Conversion and Management. 2016. T. 120. C. 430–448.

- 108. Chauhan A., Saini R.P. A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. T. 38. C. 99-120.
- 109. Amir A., Amir A., Che H.S.6 et al. Comparative analysis of high voltage gain DC-DC converter topologies for photovoltaic systems // Renewable Energy. 2019. T. 136. C. 1147–1163.
- 110. Константинов Г.Г., Фам Конг Тао, Киселев В.И. Компьютерная модель преобразователя для зарядно-разрядного комплекса аккумуляторных батарей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 2. С. 107–122. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-2-107-122.
- 111. 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.
- 112. Obukhov S., Plotnikov I., Kryuchkova M. Simulation of Electrical Characteristics of a Solar Panel // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2016. T. 132. C. 012017.
- 113.Obukhov S.G., Plotnikov I.A. Simulation model of operation of autonomous photovoltaic plant under actual operating conditions // Bull. Tomsk Polytech. Univ. Geo Assets Eng. 2017.
- 114. Manias S.N. Power Electronics Technology // Power Electronics and Motor Drive Systems. , 2017.
- 115. Tremblay O., Dessaint L.-A., Dekkiche A.-I. A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles // 2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. : IEEE, 2007. C. 284–289.
- 116. Tremblay O., Dessaint L.A. Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications // World Electr. Veh. J. 2009.
- 117. Обухов С.Г., Плотников И.А. Модель солнечной панели в МАТLАВ SIMULINK // Альтернативная энергетика и экология: Международный научный журнал. 2014. № 21(161). С. 51–59.
- 118. Обухов С.Г., Плотников И.А.. Моделирование и исследование режимов работы солнечной фотоэлектрической станции с контроллером максимальной мощности // Альтернативная энергетика и экология: международный научный журнал. 2015. № 13-14. С. 38–50.
- 119. Коршунов А. Динамический расчет стабилизированного понижающего преобразователя напряжения постоянного тока // Силовая электроника. 2005. №3. С. 88–91.
- 120. Ayop R., Wei Tan C. Design of boost converter based on maximum power point resistance for photovoltaic applications // Solar Energy. 2018. T. 160. C. 322–335.

Ayop R., Wei Tan C. Design of boost converter based on maximum power point resistance for photovoltaic applications // Solar Energy. 2018. T. 160. C. 322–335.

- 121. Белов Г., Серебрянников А. Структурные динамические модели и частотный метод синтеза двухконтурных систем управления импульсными преобразователями // Силовая электроника. 2008. №3. С. 98–106.
- 122. Rashid M.H. Power Electronics Handbook: Devices, Circuits and Applications. 3rd Edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. C. 1409.
- 123. Hart, Power Electronics. Tata McGraw-Hill Education // Valparaiso University, Indiana. 2011.
- 124. Maniktala, S. Switching Power Supplies A-Z // Elsevier, 2012.
- 125. Mohan, N., & Undeland, T. M. Power electronics: converters, applications, and design // John Wiley & Sons, 2007.
- 126. Обухов, С.Г., Хошнау З.П. Прогнозирование режимов потребления электрической энергии автономными энергетическими системами // Электрические станции. 2012. №. 11. С. 43–47.
- 127. Обухов С.Г., Плотников И.А. Математическая модель прихода солнечной радиации на произвольно-ориентированную поверхность для любого региона России // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). 2017. № 16-18. С. 43–56. DOI: 10.15518/isjaee.2017.16-18.043-056
- 128. Razmjoo A., Shirmohammadi R., Davarpanah A., Pourfayaz F., Aslani A.Standalone hybrid energy systems for remote area power generation // Energy Reports. – 2019. – T. 5. – C. 231–241. DOI: 10.1016/j.egyr.2019.01.010
- 129.Phommixay S., Doumbia M.L., St- Pierre D.L. Review on the cost optimization of microgrids via particle swarm optimization // International Journal of Energy and Environmental Engineering. – 2020. – T. 11. – C. 73–89. DOI: 10.1007/s40095-019-00332-1
  - 130.Chauhan A. A., Saini R.P. Review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2014. - T. 38. - C. 99-120. DOI: 10.1016/j.rser.2014.05.079
  - 131.Сайт «Расписание погоды». https://rp5.ru/ (дата обращения: 10.05.2020).
  - 132.Денисов, К.С. Решение задачи комплексного энергоснабжения автономного потребителя с целью уменьшения экономических затрат / К.С. Денисов, В.И. Велькин, А.Н. Тырсин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 84–92. DOI: 10.14529/power190309
  - 133.Lu, J. Multi-Objective Optimal Design of Stand-Alone Hybrid Energy System Using Entropy Weight Method Based on HOMER / J. Lu, W. Wang, Y. Zhang, S. Cheng // Energies. – 2017. – T. 10, № 1664. – C. 1–17. DOI: 10.3390/en10101664

- 134.Eriksson, E.L.V. Optimization of renewable hybrid energy systems e A multiobjective approach / E.L.V. Eriksson, E.M. Gray // Renewable Energy. – 2019. – T. 133. – C. 971–999. DOI: 10.1016/j.renene.2018.10.053
- 135.Обухов, С.Г. Методика выбора ветроэнергетических установок малой мощности / С.Г.Обухов, М.А.Сурков, З.П.Хошнау // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2011. – №. 2. – С. 25-30.
- 136.Обухов, С. Г. Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации / С.Г. Обухов, И.А. Плотников // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 6. С. 38–51
- 137.Обухов, С.Г. Прогнозирование режимов потребления электрической энергии автономными энергетическими системами / С.Г. Обухов, З.П. Хошнау // Электрические станции. 2012. №. 11. С. 43–47.
- 138.Matt, C.F. Optimization of the Operation of Isolated Industrial Diesel Stations / C.F. Matt, L.S.R. Vieira, G.F.W. Soares, L.P.T. de Faria // 6th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO6). – Rio de Janeiro. 2005. C. 1–8.

#### Приложение А. Акты о внедрении результатов диссертационной работы

Копия акт 1

TOMSK томский POLYTECHNIC ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ UNIVERSITY УНИВЕРСИТЕТ Министерство науки и высшего образования Российской Федерации федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ) УТВЕРЖДАЮ: Проректор по науке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» М.С. Юсубов 2020 г. AKT использования результатов диссертационной работы Ибрагим Ахмед Ибрагим Мохамед в учебном процессе Томского политехнического университета Настоящим актом удостоверяется, что материалы диссертационной работы А. Ибрагима «Применение эволюционных алгоритмов для повышения эффективности гибридных систем электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии гии » по специальности 05.09.03 - «Электротехнические комплексы и системы» применяются в учебном процессе Инженерной школы энергетики НИ ТПУ при подготовке магистров по направлению 13.04.02 - Электроэнергетика и электротехника, по образовательной программе «Электроснабжение и альтернативная энергетика» при изучении дисциплин «Интеллектуальные системы электроснабжения с возобновляемыми энергоисточниками» и «Интегрирование в системы электроснабжения установок возобновляемой энергетики». А.С. Матвеев Директор ИШЭ, к.т.н., доцент И.о. заведующего кафедрой А.С. Ивашутенко руководителя ОЭЭ на правах кафедры

### Копии 2-го акта



# ООО "ВДМ-ТЕХНИКА"

Общество с ограниченной ответственностью «ВДМ-техника» ИНН 7707825048, КПП 772501001, ОГРН 1147746081383, ОКПО 27572084, ОКВЭД 72.19, 27.11. Адрес: Российская Федерация, 115093, Москва г., Павловская ул., дом 27, строение 3, офис 206 Р/сч 4070281000000019133 в ПАО "Промсвязьбанк", г. Москва, к/сч 3010181040000000555, БИК 044525555. Тел.факс: +7 (495) 626-4901. E-mail: vdm-tech@mail.ru. Skype: vdm-tech. http://ydm-tech.ru/

УТВЕРЖДАЮ: Генеральный директор ООО «ВДМ-техника» В.Г. Масолов сентября 2020 г. АКТ о внедрении результатов диссертационной работы

Ибрагим Ахмед Ибрагим Мохамед

«Применение эволюционных алгоритмов оптимизации для повышения эффективности электроэнергетических систем с возобновляемыми источниками энергии»

Настоящим актом удостоверяется, что материалы диссертационной работы А. Ибрагима «Применение эволюционных алгоритмов оптимизации для повышения эффективности электроэнергетических систем с возобновляемыми источниками энергии» использовались ООО «ВДМ-техника» при выполнении Соглашения о предоставлении из федерального бюджета гранта в форме субсидии от 26.09.2017 № 075-11-2018-181 (внутренний номер 14.576.21.0098) «Разработка комбинированного накопителя энергии на основе аккумуляторных и суперконденсаторных модулей для локальных систем электроснабжения с ВИЭ» в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научнотехнологического комплекса России на 2014-2020 годы».

Результаты диссертационной работы А. Ибрагима использовались при разработке, проектировании и изготовлении на испытательном стенде-полигоне локальной системы электроснабжения (микрогрид) на основе ВИЭ.

Главный инженер ООО «ВДМ-техника»

С.Я. Бергер

## Приложение Б. Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ



## российская федерация



斑

斑

斑

密

路路

斑

密

密

密

密

斑

發發發

弦弦

路路路

斑

密

斑

密

密

密

密

密

密

密

密

密

密

密

密

密

密

密

肉

母母

密

密



**密路路路路** 

密

斑

密

路路

密

密

密

容

斑

路路

敬敬

發發發

密

密

斑

密

密

斑

密

斑

斑

密

密

斑

密

密

斑

路路

田

**安** 及 及 及 及

密

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

## № 2018664032

Отслеживание точки максимальной мощности солнечной батареи при помощи алгоритма поиска cuckoo

Правообладатель: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (RU)

Автор: Ибрагим Ахмед Ибрагим Мохамед (EG)



Заявка № 2018661278 Дата поступления 16 октября 2018 г.

Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ **09 ноября 2018 г.** 

> Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Tellere. Г.П. Ивлиев





**路路路路路** 

密

斑

路路

斑

發發發發

發發

政政政士

斑

斑

斑

密

路路

斑

斑

斑

斑

斑

**珞珞珞珞珞珞珞珞珞**格格格格格格

# СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020612730

Выбор параметров преобразователя напряжения и контроллера максимальной мощности автономной фотоэлектрической станции

Правообладатель: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (RU)

Авторы: Ибрагим Ахмед Ибрагим Мохамед (EG), Обухов Сергей Геннадьевич (RU)



Заявка № 2020611282

Дата поступления **11 февраля 2020 г.** Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ **28 февраля 2020 г.** 

> Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Teller Г.П. Ивлиев

**密路路路路** 

密