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

Уральский энергетический институт

Кафедра «Электротехника»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ ПЕРЕД ГЭК

Зав. кафедрой «Электротехника»
_____ В.Э. Фризен
(подпись) (Ф.И.О.)
«13» июня 2024 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИИ МЕСТ РАЗМЕЩЕНИЯ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Научный руководитель: С.А. Ерошенко подпись
канд. техн. каук, доцент
Нормоконтролер: А.И. Хальясмаа подпись
Студент группы ЭНМ-221201 И.А. Кириллов подпись

Екатеринбург
2024

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

Институт *Уральский энергетический институт*
Кафедра *Электротехника*
Направление подготовки *01.04.04 Искусственный интеллект в электроэнергетике*
Образовательная программа

УТВЕРЖДАЮ
Зав. Кафедрой В.Э. Фризен
«15» января 2024г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

студента *Кириллова Ильи Алексеевича* **группы** *ЭНМ-221201*
(фамилия, имя, отчество)

1. Тема выпускной квалификационной работы *Разработка метода оптимизации мест размещения ветроэлектростанций*

Утверждена распоряжением по институту от «10» января 2024г. № 33.07-05/003

2. Руководитель Ерошенко Станислав Андреевич, канд. техн. наук, доцент
(Ф.И.О., должность, ученое звание, ученая степень)

3. Исходные данные к работе *метеорологические, экономические и технические данные необходимые для строительства ветроэлектростанции*

4. Перечень демонстрационных материалов Презентация (15 слайдов)

5. Календарный план

№ п/п	Наименование этапов выполнения работы	Срок выполнения этапов работы	Отметка о выполнении
1.	*1 Анализ существующих подходов к развитию возобновляемых источников энергии*	до 5 апреля 2024 г.	
2.	*2 Разработка алгоритма оптимизации мест размещения ветроэлектростанций*	до 10 мая 2024 г.	
2.	*3 Анализ эффективности выбранных параметров для места размещения ветроэлектростанции*	до 2 июня 2024 г.	
3.	*ВКР в целом*	до 6 июня 2024 г.	

Руководитель _____ *Ерошенко Станислав Андреевич*
(подпись) Ф.И.О.
Задание принял к исполнению 15.01.2024 _____
дата (подпись)

6. Выпускная квалификационная работа закончена «6» июня 2024 г. считаю возможным допустить Кириллова Илью Алексеевича к защите выпускной квалификационной работы закончена в Государственной экзаменационной комиссии.
Руководитель_____ _____
(подпись) Ф.И.О.

7. Допустить Кириллова Илью Алексеевича к защите магистерской диссертации в Государственной экзаменационной комиссии (протокол заседания кафедры №___ от «___» _____ 2024 г.).

Зав. кафедрой _____ ___В. Э. Фризен_____
(подпись) Ф.И.О.

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка 77 с., 5 рис., 12 табл., 47 источн.

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ, ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ, ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ, МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ

Целью настоящей работы является создание новых подходов к оптимизации мест размещения ВЭС с использованием метода генетических алгоритмов.

В работе рассматриваются вопросы оптимизации целевой функции для нахождения оптимального места размещения ветроэлектростанций с использованием генетического алгоритма.

В работе описан разработанный метод оптимизации мест размещения ветроэлектростанций, основанный на генетическом алгоритме.

СОДЕРЖАНИЕ

РЕФЕРАТ 4

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, СОКРАЩЕНИЙ 7

ВВЕДЕНИЕ..... 8

1 АНАЛИЗ СУЩЕТСВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К РАЗВИТИЮ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ 12

1.1 Типы и принцип работы ветроэлектростанций 12

1.2 Развитие и поддержка возобновляемых источников энергии в РФ……..20

1.3 Анализ подходов подключения ветроэлектростанций к электрической сети 27

1.4 Выводы..... 34

2 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ МЕСТ РАЗМЕЩЕНИЯ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ 37

2.1 Анализ существующих методов и подходов модели оптимизации размещения в энергетике. 37

2.2 Определение задачи оптимизации мест размещения ветроэлектростанций 43

2.3 Генетический алгоритм 52

2.4 Расчетный пример использования генетического алгоритма для поиска оптимального места размещения ветроэлектростанций..... 55

2. 5 Выводы 64

3 АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫБРАННЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ МЕСТА РАЗМЕЩЕНИЯ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ 66

3.1 Географические и климатические особенности, влияющие на выработку электроэнергии на ветроэлектростанциях 66
3.2 Выбор типов ветровых установок 70
3.3 Расчет выработки электроэнергии 73
Выводы 75
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 76
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 77
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Код алгоритма 84

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, СОКРАЩЕНИЙ

ВЭС	–	Ветроэлектростанция
ВИЭ	–	Возобновляемые источники энергии
ЕЭС России	–	Единая энергетическая система России
ГА	–	Генетический алгоритм
РГ	–	Распределенная генерация
ЭЭС	–	Электроэнергетическая система
IEEE	–	Institute of Electrical and Electronics Engineers
СНЭЭ	–	Система накопления электрической энергии
GWEC	–	Глобальный ветроэнергетический совет (GWEC)
WWEA	–	Всемирная ассоциация ветроэнергетики (WWEA)

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Согласно исследованиям, в начале 2019 года общая установленная мощность всех ВЭС превысила 600 ГВт. С 2009 года наблюдается устойчивый рост суммарной мощности ветрогенераторов в мире, который составляет примерно 38–40 гигаватт в год. Это связано с активным развитием ветроэнергетики в Соединённых Штатах Америки, Индии, Китае и Европейском союзе [1].

Глобальный ветроэнергетический совет (GWEC) опубликовал отчет о развитии ВЭС в 2021 году, который содержит прогноз будущего отрасли ветряных генераторов. Так, в 2021 году в строй введены ВЭС общей мощностью 93,6 ГВт, примерно столько же, сколько в 2020 году. Общая установленная мощность всех ветряных электростанций в мире составила порядка 837 ГВт.

Прогноз GWEC (см. Рисунок 1) на ближайшие годы говорит о том, что отрасль ВЭС будет расти со среднегодовым (CAGR) темпом 6,6%, и в период 2022—2026 гг. в мире построят ещё 557 ГВт ветровых электростанций, следовательно, средний прирост генерации ВЭС в мире в год будет составлять более 110 ГВт.

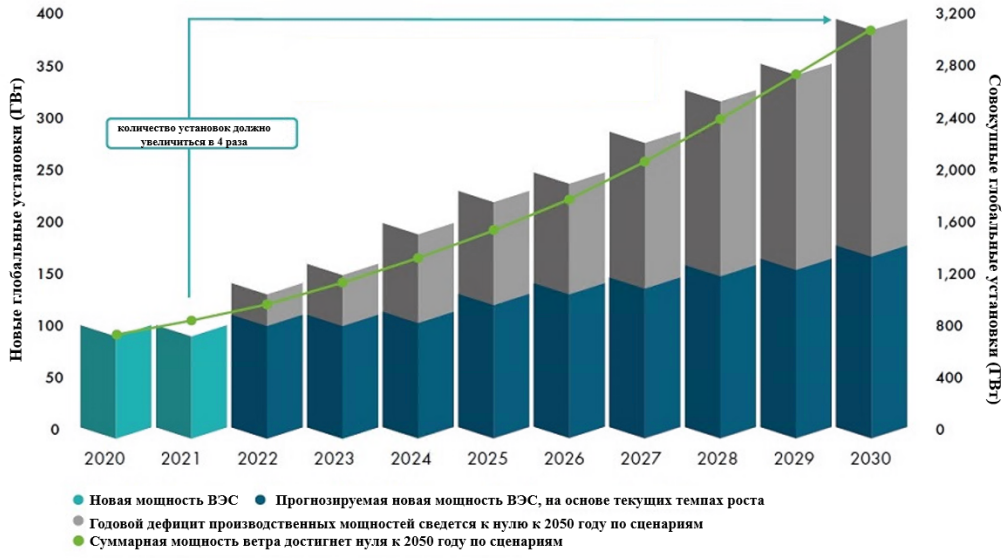

Рисунок 1 – Прогнозирование мощности ВЭС в мире

Понятие «зеленая энергетика» [2] и развитие отрасли возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в мире на сегодняшний день является приоритетным направлением в энергетики и вопросах изменения климата на планете. Создание технологий по использованию неисчерпаемых и экологически чистых ресурсов, а также достижению климатических целей (нулевого баланса выбросов) служит приоритетом при исследованиях возобновляемой энергетики.

Помимо значительного влияния экологического фактора, существует вероятность к тенденции по переходу с централизованного электроснабжения удаленных потребителей на объекты ВИЭ-генерации [3]. Стоит отметить, что, если местные объекты ВИЭ способны обеспечить электроснабжение прилегающих территорий и будут служить бесперебойным источником электроэнергии, в таком случае, строительство ВИЭ-объекта вместо линий электропередачи (ЛЭП) является целесообразным.

В Российской Федерации поддержка возобновляемых источников энергии и их развитие происходит поэтапно. На данный момент существуют программы поддержки, субсидии и гранты на государственном уровне, которые являются стимулирующими к развитию «зеленой энергетики» механизмами. [4]

Основным механизмом поддержки стал конкурсный отбор инвестиционных проектов по строительству объектов ВИЭ-генерации, результатом которого служит заключение договоров поставки мощности на оптовый рынок электроэнергии.

Электроэнергетические системы, в которых большая доля ВИЭ-генерации различны по сравнению с функционирующими традиционными ЭЭС. Первым и наиболее очевидным отличием традиционных ЭЭС от ЭЭС с ВИЭ-генерацией является невозможность управления объемами генерации на ВИЭ-объектах. Проблема низкой выработки электроэнергии в периоды климатических особенностей региона, которые могут помешать в достаточной

степени использовать потенциал ВИЭ-генерации, именно поэтому вопрос резервирования объектов является значимым. На данный момент, решением служат системы накопления электрической энергии (СНЭЭ) и подключение безуглеродных ЭЭС на параллельную работу с традиционными ЭЭС [5-7].

Существуют и проблема стохастического характера генерации ВИЭ при эксплуатации, именно поэтому планирование режимов электроэнергетических систем происходит с высокой степенью неопределенности. Климатические особенности и смена времени суток влияет на режимы работы ВИЭ, которые влияют на перетоки мощности в сети. Переток мощности в централизованных электроэнергетических системах, преимущественно однонаправленный, но в энергосистемах с ВИЭ перетоки в сети имеют свойство изменять направление. Данная особенность влияет на выбор топологии сети, так как выбор одной топологии будет являться не оптимальной для различных погодных условий и временных промежутков по величине потерь мощности и недостаточной/избыточной загрузке линий электропередачи.

Таким образом вышеописанное подтверждает актуальность задач к эффективному размещению объектов ВЭС на основе возобновляемых источников энергии с использованием аналитическо-статистических методов и методов машинного обучения.

Объектом исследования является электроэнергетическая система с высокой долей генерации на основе ветроэлектрических станций.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы, обеспечивающие эффективность размещения и функционирования ВЭС.

Цель работы — разработка математических подходов к эффективному размещению объектов ВЭС на основе возобновляемых источников энергии с использованием аналитически-статистических методов и методов машинного обучения.

Задачи, поставленные для достижения цели:

1) анализ существующих методов и подходов к оптимизации мест размещения объектов генерации электроэнергии на базе возобновляемых источников энергии;

2) разработка метода оптимизации мест размещения ветроэлектростанций с использованием генетического алгоритма;

3) анализ эффективности оптимизации размещения ВЭС и влияния среды на выработку электроэнергии.

Научная новизна работы заключается в следующем: разработан новый метод оптимизации мест размещения ветроэлектростанций с использованием генетического алгоритма, позволяющий повысить точность в определении оптимального места для размещения ВЭС.

1 АНАЛИЗ СУЩЕТСВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К РАЗВИТИЮ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

1.1 Типы и принцип работы ветроэлектростанций

Ветер является одним из наиболее широко используемых источников возобновляемой энергии в мире. ВЭС — это электростанции, использующие энергию ветра для выработки электроэнергии. Они могут быть классифицированы по различным критериям, таким как мощность, расположение, тип конструкции и т. д.

Рассмотрим типичную схему ветряной установки и принцип выработки электроэнергии (рисунок 2): [8]



Рисунок 2 — Схема и элемента ветряной установки

Элементы современной ветроэлектрической установки: 1) лопасть, 2) ротор, 3) механизм поворота лопастей, 4) тормозное устройство, 5)

тихоходный вал, 6) мультипликатор, 7) генератор, 8) контроллер, 9) анемометр, 10) флюгер, 11) гондола, 12) быстроходный вал, 13) редуктор поворота гондолы, 14) двигатель поворота гондолы, 15) башня.

Принцип работы ветряной установки для выработки электроэнергии приведен на рисунке 2 и заключается в следующем:

1) ветер вращает лопасти (1) ветряка, приводя в движение вал (12) электрического генератора (7);

2) в генераторе механическая энергия вращения преобразуется в электрическую энергию;

3) полученная электроэнергия накапливается в аккумуляторах или поступает напрямую в электросеть.

Современные ветряные установки оснащены системой управления, которая регулирует скорость вращения лопастей и контролирует выработку электроэнергии в зависимости от силы ветра. Это позволяет обеспечить стабильную работу установки и повысить её эффективность.

Ветроэнергетические системы (ВЭС) стали неотъемлемой частью мировой энергетической инфраструктуры, обеспечивая стабильный и экологически чистый источник энергии.

Согласно предварительной статистике международного агентства (WWEA — World Wind Energy Association) опубликованной 18 марта 2022 г. [9], мировой рынок ветряных турбин достиг очередного рекорда в 2021 году, когда по всему миру были установлены ветряные турбины общей мощностью 97,5 ГВт, после 92,7 ГВт в 2020 году. Общая мощность всех ветряных турбин по всему миру на момент публикации статьи превысила 840 ГВт (после 742,5 ГВт в 2020 году), что достаточно для обеспечения более 7% мирового спроса на электроэнергию. Это соответствует темпам роста в 13% по сравнению с 14% годом ранее и 10% в 2019 году.

ВЭС могут быть классифицированы по различным техническим критериям [10]:

1) по мощности — ВЭС могут быть малыми (до 100 кВт), средними (от 100 до 10 МВт) и крупными (более 10 МВт);
2) по расположению — ВЭС могут быть наземными, морскими и прибрежными;
3) по типу конструкции — ВЭС могут быть башенными, роторными и пропеллерными.

Каждый тип ВЭС имеет свои особенности и преимущества, которые определяют его применение в различных регионах и условиях. Стоит добавить, что есть также и универсальный список преимуществ и недостатков ВЭС в мире в целом.

В результате научных исследований и практического применения в мире были выведены и доказаны следующие преимущества ВЭС как источника выработки электроэнергии:

1) **возобновляемость и неисчерпаемость источника энергии.** Источником энергии служит ветер, который раскручивает лопасти ветряной установки. Если ВЭС был установлен в наиболее благоприятном районе, то данный источник энергии для раскручивания лопастей может стать неограниченным;

2) **относительная простота конструкции и эксплуатации.** Ветряные установки, как было рассмотрено раннее, отличаются несложной, в сравнении с ТЭС, АТЭС и т. д. конструкцией и простотой используемых материалов и элементов. Также относительная дешевизна в изготовлении одной установки делает ВЭС простым в освоении и создании источником выработки электроэнергии;

3) **отсутствие выбросов вредных веществ в атмосферу.** Конструкция и принцип работы ВЭС устроен таким образом, что не предполагает никаких выбросов вредных веществ при работе;

4) **возможность использования в удалённых и труднодоступных районах.** Конструкция ВЭС может быть совершенно разной. Ветряная

установка может быть выполнена в соответствии с особенностями региона, в том числе и труднодоступных, для достижения максимального КПД выработки электроэнергии. Именно данная особенность позволяет использовать ВЭС там, где нет возможности применить альтернативный источник энергии;

Однако, как и у любого объекта генерации электроэнергии, у ВЭС имеются свои недостатки:

1) **зависимость от погоды и климата.** Ветряные установки требуют условий, в которых будет постоянное вращение лопастей. В регионах с низкой среднегодовой скоростью ветра или частыми штилями использование ветрогенераторов может быть неэффективным;

2) **шум.** Ветряные турбины могут создавать шум, особенно на высоких скоростях вращения, которые неблагоприятно сказывается на обитателей близлежащих районов;

3) **влияние на окружающую среду.** Ветряные установки могут влиять на миграцию птиц и летучих мышей, а также на среду обитания некоторых видов животных;

4) **высокие начальные затраты.** Установка ветряных турбин может потребовать значительных инвестиций, особенно если речь идёт о крупных проектах;

5) **ограничения по месту установки.** Ветряные турбины должны быть установлены в местах с достаточной скоростью ветра, что ограничивает их использование в некоторых регионах;

6) **влияние на радио- и телесигналы.** Ветряные турбины, особенно крупные, могут влиять на радио- и телевизионные сигналы в близлежащих районах;

7) **непредсказуемость энергии.** Ветер — это непостоянный источник энергии, и его мощность может колебаться в зависимости от

погодных условий. Это может затруднить планирование и управление энергосистемой;

8) **отходы производства.** Ветряные турбины содержат компоненты, которые могут быть опасными для окружающей среды при неправильной утилизации.

Подходы к внедрению и использованию ВЭС варьируются в зависимости от региона, политики, экономических условий и технологического развития. Для начала, рассмотрим основные подходы к использованию ВЭС в мире и страны-лидеры в данном направлении.

Дания. Является пионером в области использования ветровой энергии. Дания активно развивает офшорные (морские) ветроэнергетические парки, такие как Horns Rev и Anholt. Ветроэнергетика покрывает значительную часть энергопотребления страны.

Германия. Ведет масштабную программу Energiewende, направленную на переход к возобновляемым источникам энергии. Страна активно использует как наземные, так и морские ВЭС.

Великобритания. Имеет крупнейший в мире офшорный ветропарк — Hornsea Project. Значительные инвестиции в ветроэнергетику помогают стране достигать целей по снижению выбросов углерода.

США. Является вторым по величине рынком ветроэнергетики в мире. Ветровые фермы, такие как Alta Wind Energy Center в Калифорнии, являются одними из крупнейших на планете. Страна использует различные стимулы, включая налоговые льготы, для поощрения развития ветроэнергетики.

Канада. Активно развивает ветроэнергетику, особенно в провинциях Онтарио и Квебек. Ветроэнергетика составляет значительную часть возобновляемой энергии страны.

Китай. Является крупнейшим производителем ветровой энергии в мире. Китай активно инвестирует в развитие как наземных, так и морских ВЭС.

Ветровая энергия является ключевым компонентом стратегии страны по снижению зависимости от угля.

Индия. Активно развивает ветроэнергетику в рамках программы по увеличению доли возобновляемых источников энергии. Ветроэнергетические фермы сосредоточены в таких штатах, как Тамилнад и Гуджарат.

Бразилия. Быстро растущий рынок ветроэнергетики. Страна использует значительные ветровые ресурсы для создания крупных ветроэнергетических ферм, особенно в северо-восточных штатах.

Мексика. Развивает ветроэнергетику в рамках стратегии по увеличению доли возобновляемых источников энергии. Основные ветроэнергетические проекты сосредоточены в южных штатах, таких как Оахака.

Австралия. Страна также начала активно развивать ветроэнергетику в рамках стратегии по снижению углеродных выбросов. Ветроэнергетические фермы расположены в южных и западных регионах страны, таких как Южная Австралия и Виктория.

Все описанные выше страны наращивают потенциал развития в области ВИЭ и ускоряют переход на «зеленую» энергетику.

Основные подходы и стратегии реализации ВЭС:

1) **правительственные меры поддержки**. Включает в себя налоговые льготы, субсидии, установление квот на возобновляемую энергию и создание нормативной среды для разработок и внедрения проектов;

2) **инвестиции в исследования и развитие**. Финансирование новых технологий и улучшение существующих для повышения эффективности ВЭС;

3) **инфраструктурное развитие**. Строительство сетей передачи энергии и интеграция ВЭС в национальные энергосистемы;

4) **международное сотрудничество**: Обмен опытом и технологиями между странами для ускорения развития ветроэнергетики;

5) **социальная поддержка и образование**: Обучение специалистов и информирование населения о преимуществах ветроэнергетики.

Также, в мире существуют и основные этапы реализации объекта ВЭС. Необходимо рассмотреть и их.

Первый этап — выбор места установки. Для эффективной работы ВЭС необходимо выбрать место с высокой среднегодовой скоростью ветра. Это может быть прибрежная зона, горные районы или другие места с постоянными воздушными потоками. Это один из самых важных этапов.

Второй этап — проектирование и строительство. Необходимо разработать проект ВЭС, который будет учитывать особенности местности, климатические условия и требования к мощности. Строительство должно быть выполнено с соблюдением всех технических норм и правил безопасности.

Третий этап — управление и контроль. Необходимо разработать систему управления и контроля, которая будет обеспечивать стабильную работу ВЭС и предотвращать аварийные ситуации. Это включает в себя мониторинг скорости ветра, напряжения и тока в сети, а также автоматическое отключение ВЭС при необходимости.

Четвертый этап — интеграция в энергосистему. ВЭС могут быть интегрированы в общую энергосистему для обеспечения бесперебойного электроснабжения. Это требует координации работы ВЭС с другими источниками энергии, такими как солнечные батареи, гидроэлектростанции и тепловые электростанции.

Пятый этап — техническое обслуживание и ремонт. ВЭС требуют регулярного технического обслуживания и ремонта для поддержания их работоспособности. Это включает в себя проверку состояния лопастей, генератора, трансмиссии и других компонентов, а также замену изношенных деталей.

Шестой этап — оценка эффективности. Необходимо проводить оценку эффективности работы ВЭС на основе данных о выработке электроэнергии, затратах на обслуживание и эксплуатацию, а также экологических

последствиях. Это позволяет определить оптимальные параметры работы ВЭС и выработку электроэнергии.

Анализ подходов к использованию ВЭС в мире показывает, что интеграция ветроэлектростанций в мировую электроэнергетику является важным шагом к устойчивому развитию и снижению зависимости от ископаемых видов топлива. В начале 2011 года установленная мощность ВЭС в мире составляла свыше 196,63 тыс. МВт, что соответствовало выработке около 430 ТВтч электроэнергии, что составляет примерно 2,5% мирового потребления электроэнергии.

Страны с развитой ветроэнергетикой сталкиваются с рядом проблем, включая колебания мощности ВЭС, влияние географической дисперсии на эти колебания, увеличение резерва мощности и работу ВЭС при нарушении стабильности в энергосистеме.

Географическая дисперсия для ветроэлектростанций подразумевает стратегическое размещение ветроэлектрических установок на обширной территории для уменьшения общей вариабельности выработки энергии. Этот подход помогает компенсировать непостоянство ветровых условий в одном регионе путем использования ветровой энергии из других регионов, где в данный момент ветровые условия могут быть более благоприятными.

Для решения этих проблем разрабатываются и применяются различные подходы, включая использование краткосрочных прогнозов ожидаемой генерации ВЭС, что позволяет значительно сократить объемы резервной мощности.

Важным аспектом является разработка специальной технической политики (Grid Codes), которая регламентирует поведение ВЭС в различных ситуациях. Это поможет обеспечить надежность и стабильность работы энергосистемы при интеграции ВЭС.

Также стоит отметить, что ВЭС состоят из значительного количества ветроэнергетических установок, что делает их менее подверженными

мгновенным потерям мощности по сравнению с традиционными электростанциями. Это обеспечивает дополнительную надежность и безопасность работы энергосистемы.

Таким образом, анализ подходов к использованию ВЭС в мире показывает, что ветроэнергетика является перспективным направлением развития мировой электроэнергетики, способствующим снижению негативного воздействия на окружающую среду и обеспечению энергетической безопасности.

1.2 Развитие и поддержка возобновляемых источников энергии в РФ

Одним из важных факторов при планировании развития ВИЭ в мире является поддержка со стороны государства. В Российской Федерации, на законодательном уровне определены и закреплены следующие основные меры поддержки развития возобновляемых источников энергии: государственные субсидии, обязательства электросетевых компаний по закупке электрической энергии, выработанной на объектах ВИЭ, для компенсации потерь, ввод системы ценовых надбавок в рамках оптового и розничного рынков электроэнергии и мощности др.

Данные меры закреплены в РП РФ №1-р от 08.01.2009 «Основные направления государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2020 года» [12]. В действующем указе, в рамках распоряжения Правительства Российской Федерации были сформированы и установлены целевые показатели в долях генерирующих объектов на базе ВИЭ в общей структуре генерирующих мощностей ЕЭС России.

Федеральный закон, закрепляющий основы развития ВИЭ в РФ — ФЗ №250 «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской

Федерации в связи с осуществлением мер по реформированию Единой энергетической системы России» [11]. В данном документе, впервые в РФ был сформирован и представлен перечень технологий генерации электрической энергии на базе ВИЭ, который на момент написания диссертационной работы считается актуальным. В списки представлены такие источники ВИЭ, как биомасса, солнечная энергия, энергия ветра, геотермальная энергии и прочие источники.

Можно сделать вывод о том, какие результаты в итоге после принятия всех мер и механизмов поддержки получились:

1) **рост инвестиций в сектор ВИЭ:** повышение интереса со стороны отечественных и зарубежных инвесторов, увеличение количества проектов по строительству солнечных, ветровых и гидроэлектростанций;

2) **развитие отечественного производства оборудования для ВИЭ:** стимулирование создания новых производств в России., снижение зависимости от импорта оборудования;

3) **увеличение доли ВИЭ в энергобалансе:** повышение устойчивости и диверсификации энергетической системы, снижение экологического воздействия энергетического сектора;

4) создание новых рабочих мест: рост числа рабочих мест в секторах строительства, эксплуатации и обслуживания объектов ВИЭ.

Ниже представлен рисунок 3, иллюстрирующий динамику развития ВИЭ в России по годам, начиная с 2012 года. В статистику вошли: ВЭС, СЭС, МГЭС (Малая гидроэлектростанция), ГеоЭС и БиоЭС. [13]

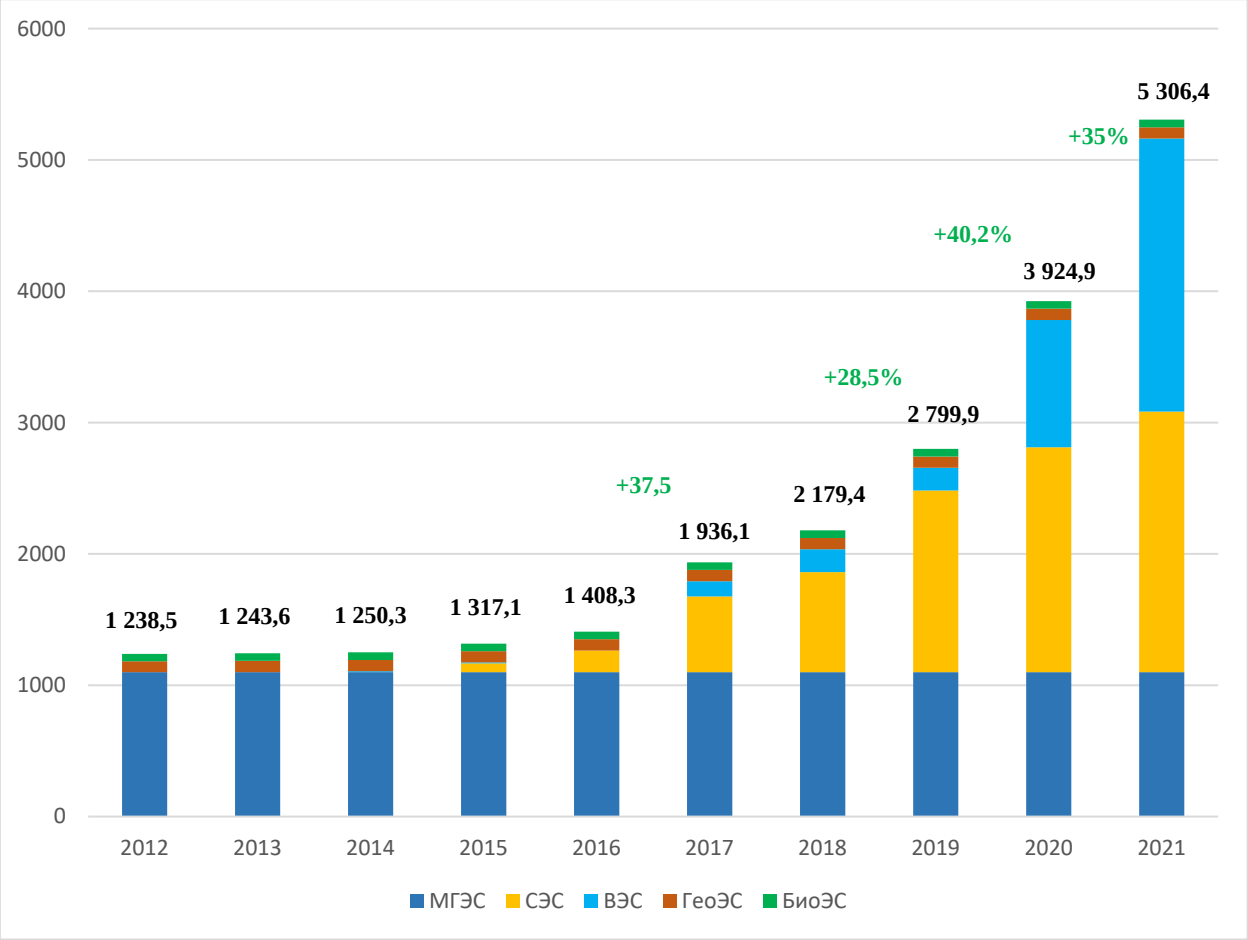

Рисунок 3 — Динамика установленной электрической мощности ВИЭ в России по состоянию на 1 января 2022 г., МВт

Как можно заметить, исходя из графика, на протяжении последних десяти лет для динамики установленной электрической мощности ВИЭ в России характерен постоянный, но не равномерный рост. С 2012 года общая установленная мощность возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в России значительно возросла. К началу 2022 года она составила 5,3 гигаватта, увеличившись в 4,3 раза по сравнению с предыдущими показателями. При этом 35% от общего объёма было введено в эксплуатацию в 2021 году.

С 2017 года солнечные и ветровые электростанции общей мощностью 388,6 МВт, расположенные в Республике Крым, начали поставлять электроэнергию в Единую энергетическую систему России. Благодаря этому общая установленная мощность электростанций на возобновляемых

источниках энергии в 2017 году увеличилась на 37,5 % по сравнению с 2016 годом.

Ниже представлен список из 20 крупнейших электростанций на базе ВИЭ в России по состоянию на 2024 год (таблица 1) [14].

Таблица 1 — Список крупнейших электростанций на базе ВИЭ в РФ

№ п/п	Объект	Местонахождение	Мощность, МВт	Год ввода	Вид энергии
1	Кольская ВЭС	Мурманская область	202,35	17.03.2022	Энергия ветра
2	СЭС «Перово»	Республика Крым	105,6	19.05.2011	Энергия солнца
3	Азовская ВЭС	Ростовская область	90,09	29.03.2021	Энергия ветра
4	СЭС «Охотниково»	Республика Крым	82,6	2011	Энергия солнца
5	Адыгейская ВЭС. 3 этап	Южный федеральный округ, Республика Адыгея	70	10.04.2020	Энергия ветра
6	СЭС «Николаевка»	Республика Крым	70	01.08.2015	Энергия солнца
7	Оренбургская СЭС-3, установленной мощностью 60 МВт	Оренбургская область	60	17.10.2018	Энергия солнца
8	Салынская ВЭС.	Республика Калмыкия	50,4	02.11.2020	Энергия ветра
9	Целинская ВЭС.	Республика Калмыкия	50,4	02.11.2020	Энергия ветра
10	Казачья ВЭС.	Ростовская область	50,4	03.09.2021	Энергия ветра
11	Котовская ВЭС.	Волгоградская область	50,4	01.10.2021	Энергия ветра
12	Излучная ВЭС.	Астраханская область	50,4	01.10.2021	Энергия ветра
13	Старицкая ВЭС.	Астраханская область	50,4	01.10.2021	Энергия ветра
14	Сулинская ВЭС (Каменско-Красносулинская ВЭС - Южная площадка. I Этап	Ростовская область	49,4	27.01.2020	Энергия ветра
15	Сулинская ВЭС (Каменско-Красносулинская ВЭС - Южная площадка. II Этап	Ростовская область	49,4	27.01.2020	Энергия ветра

Продолжение таблицы 1

№ п/п	Объект	Местонахождение	Мощность, МВт	Год ввода	Вид энергии
16	Каменская ВЭС (Каменско-Красносулинская ВЭС - Северная площадка. I Этап	Ростовская область	49,4	05.03.2020	Энергия ветра
17	Каменская ВЭС (Каменско-Красносулинская ВЭС - Северная площадка. II Этап	Ростовская область	49,4	20.03.2020	Энергия ветра
18	Адыгейская ВЭС. 2 этап	Южный федеральный округ, Республика Адыгея	47,5	16.03.2020	Энергия ветра
19	Оренбургская СЭС-1, установленной мощностью 45 МВт	Оренбургская область	45	25.10.2018	Энергия солнца
20	Малодербетовская СЭС 60 МВт (2 этап 45 МВт).	Республика Калмыкия	45	24.09.2020	Энергия солнца

Поддержка на оптовом рынке электрической энергии и мощности

Первые формирования механизмов поддержки для развития генерации на основе возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности (ОРЭМ) началось лишь в 2010 году. Тогда была введена схема компенсации платы за мощность в рамках ОРЭМ. Такой механизм стимулирования направлен на обеспечение готовности электростанции поставлять электроэнергию, что измеряется в МВт в месяц. Схема была официально утверждена посредством Постановления Правительства Российской Федерации от 28 мая 2013 г. № 449 «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности» (далее — Постановление № 449). Этот документ предполагал поддержку развития возобновляемых источников энергии через заключение договоров о предоставлении мощности (ДПМ). ДПМ — это долгосрочный договор, который даёт инвестору право на

ежемесячное получение выплат за мощность, которую он обязан поставлять в течение определённого периода времени.

Следует подчеркнуть, что при определении приоритетности выдачи мощности от электростанций, генерирующие объекты на основе ВИЭ занимают четвёртое место. Они уступают генераторам, формирующим резерв мощности, генераторам, участвующим в традиционном ДПМ (ГЭС, АЭС), а также генераторам, работающим в вынужденном режиме.

После ввода в действие Постановления № 449 было проведено множество конкурсных отборов и только за период с момента создания 2013 по 2021 г. было отобрано более 100 проектов по реализации электростанций на базе ВИЭ. Суммарная мощность отобранных только лишь в 2021 году проектов составила 2,7 ГВт, что является рекордом. Показатели снижения цены электроэнергии на основе ВИЭ сделало данный источник энергии самым дешевым на ОРЭМ. Суммарно, стоимость электроэнергии снизилась примерно на 85%, и тенденция к дальнейшему снижению сохранится как минимум до 2030 года. Статистика показывает, что рынок ВИЭ стал для инвесторов интересным и привлекательным, что послужило толчком к развитию ВИЭ в России, несмотря на крайне ограниченный объём рынка и жесточайшую конкуренцию. [15]

Также в разработке Правительства РФ находятся всё больше мер и механизмов поддержки развития ВИЭ.

Поддержка ВИЭ на розничном рынке электроэнергии и мощности

Розничный рынок электроэнергии и мощности является одним из ключевых сегментов электроэнергетической отрасли. Он охватывает широкий круг потребителей, включая население, предприятия малого и среднего бизнеса, а также крупные промышленные объекты. На этом рынке происходит продажа и покупка электроэнергии и мощности между участниками рынка, такими как генерирующие компании, сетевые организации, сбытовые компании и конечные потребители.

Одним из важных аспектов развития розничного рынка является поддержка возобновляемых источников энергии. Основой для поддержки ВИЭ является ПП РФ № 442 от 04.05.2012 [16], а именно — реализация схемы продажи электрической энергии сетевым организациям в целях компенсации потерь мощности по регулируемым тарифам.

В Постановлении № 442 закреплено, что сетевые компании в первоочередном порядке должны покупать электрическую энергию, выработанная на объектах генерации электроэнергии на основе ВИЭ, чтобы компенсировать потери мощности в электрических сетях. Однако, тарифы, устанавливаемые отдельно для каждого генерирующего объекта, обязаны возместить объем инвестиций в течение 15 лет.

Дополнение к данному Постановлению, было внесено в ПП №47 от 23.01.15 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства РФ по вопросам поддержки квалифицированных генерирующих объектов, функционирующих на основе использования возобновляемых источников энергии и реализующих электрическую энергию на розничных рынках» [17], в котором более детально уточнили механизм продажи электроэнергии на основе ВИЭ.

В соответствии с Приказом Минэнерго России от 30.11.2023 № 1095 «Об утверждении схемы и программы развития электроэнергетических систем России на 2024 — 2029 годы» для того, чтобы получить поддержку проекта от государства, он должен быть в реестре схемы и программ развития электроэнергетики (СиПРЭ) региона, в котором будет реализована электростанция на базе ВИЭ. Данный аспект подчеркивает необходимость решения задачи оптимизации мест размещения ВЭС.

1.3 Анализ подходов подключения ветроэлектростанций к электрической сети

Подключение ветроэнергетических систем (ВЭС) к электрической сети сопровождается рядом технических и организационных проблем. Эти проблемы связаны как с характеристиками самих ветроэнергетических установок, так и с особенностями работы энергосистемы. Рассмотрим основные из них:

1) переменность и непредсказуемость генерации. Интермиттентность генерации — ветроэнергетические установки зависят от ветровых условий, которые могут изменяться быстро и непредсказуемо. Это приводит к колебаниям мощности, которые сложно прогнозировать и балансировать в сети. Необходимость резервирования — из-за переменности генерации необходимо иметь резервные мощности, которые могут быстро компенсировать снижение генерации ветра. Это увеличивает затраты на поддержание стабильности сети;

2) качество электроэнергии. Гармонические искажения — инверторы ВЭС могут создавать гармонические искажения в сети, что влияет на качество электроэнергии и может вызывать проблемы в работе других электрических устройств. Фликер — быстрое изменение выходной мощности ВЭС может вызвать фликер (мерцание) напряжения, что также влияет на качество электроэнергии и может быть заметно потребителям;

3) реактивная мощность и напряжение. ВЭС могут генерировать или потреблять реактивную мощность, что влияет на уровень напряжения в сети. Это требует дополнительных мер по регулированию напряжения для поддержания его стабильности;

4) синхронизация и устойчивость сети. некоторые виды ВИЭ, такие как солнечная и ветровая энергия, могут быть нестабильными, что требует дополнительных мер по стабилизации напряжения и частоты в сети;

5) аварийные режимы и надежность. Поведение при сбоях — ВЭС должны быть способны надежно отключаться и снова подключаться к сети после аварийных ситуаций, чтобы не создавать дополнительные риски для стабильности энергосистемы;

6) инфраструктура и сети передачи**.** Пропускная способность сетей— в некоторых регионах сети передачи электроэнергии могут быть не готовы к приему большого объема энергии от ВЭС, что требует модернизации и расширения инфраструктуры. Отдаленность от централизованных сетей — ВЭС часто строятся в удаленных районах с хорошими ветровыми условиями, где может отсутствовать необходимая инфраструктура для подключения к основной сети;

7) отсутствие адаптированной нормативно-технической документация, регламентирующей подключение объектов генерации электрической энергии на базе ВИЭ к сети и работу в составе энергосистемы. В результате, возникают трудности при решении описанных проблем.

Также стоит описать необходимые этапы для подключения объектов ВИЭ к электрической сети:

1) **разработка проекта подключения.** Проект должен содержать все необходимые технические и организационные решения для безопасного и надёжного подключения объекта к сети;

2) **получение технических условий.** Сетевые организации выдают технические условия, содержащие требования к объекту и его подключению;

3) **выполнение работ по подключению.** Проводятся работы по строительству линий электропередачи, установке оборудования и подключению объекта к сети;

4) **приёмка выполненных работ.** После завершения работ проводится проверка соответствия объекта техническим условиям и правилам безопасности;

5) **заключение договора на поставку электроэнергии.** После успешного подключения заключается договор на поставку электроэнергии между генерирующим объектом и сетевой организацией.

Рассмотрим основные подходы к подключению ВЭС в электроэнергетическую систему.

Прямое подключение непосредственно к распределительной сети, без использования дополнительных устройств и оборудования. Данный способ самый дешевый с экономической точки зрения, однако требует тщательного анализа параметров сети и ветрогенератора для обеспечения стабильности и надёжности работы.

Подключение с помощью преобразователя частоты (рисунок 4). В этом случае ветрогенератор вырабатывает переменный ток с частотой, отличной от частоты сети. Для подключения к сети используется преобразователь частоты, который преобразует переменный ток в постоянный, а затем обратно в переменный с нужной частотой. Это позволяет обеспечить более стабильную работу ВЭС и снизить влияние на сеть. Данный пример был рассмотрен в статье Хусаинов Б.Р., Сагадеев В.В. — «Подключение возобновляемых источников энергии к трехфазной системе энергоснабжения» [18]. В ней содержится детальная информация о процессе подключения источника электроэнергии на базе ВИЭ через контроллер управления трехфазным инвертером. Данный способ применим только к трехфазной сети и находится в приоритете при планировании проектов.

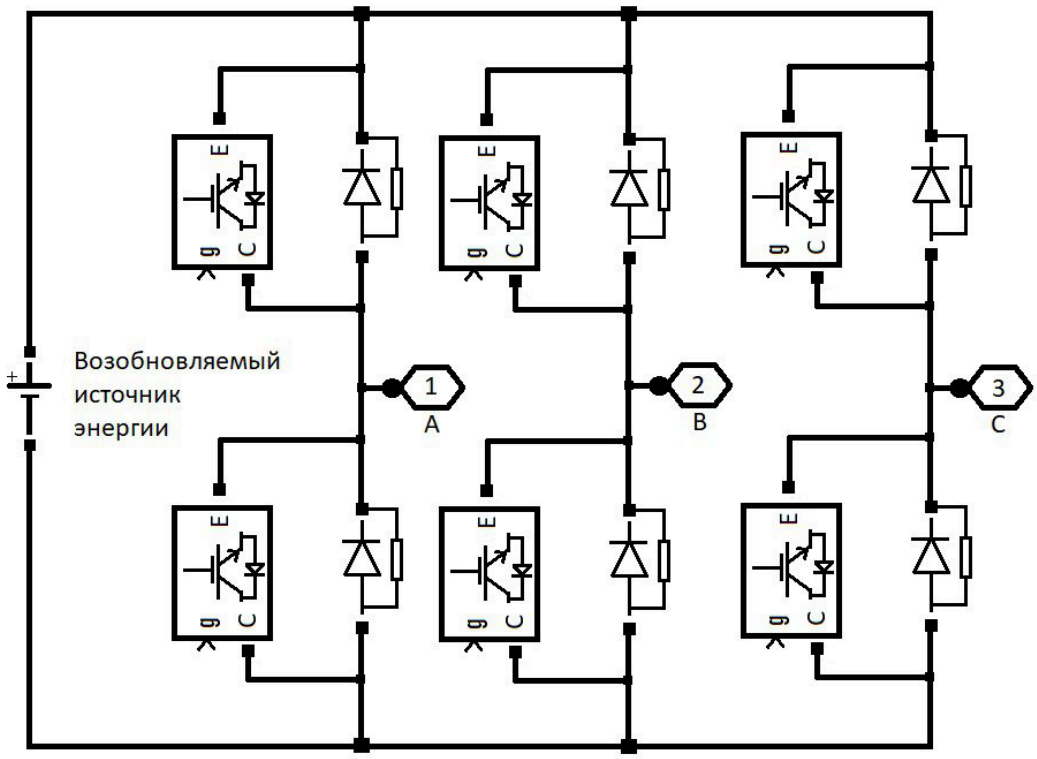

Рисунок 4 — Схема подключения ВИЭ с помощью трехфазного инвертора

Следующий подход заключается в использовании накопителей энергии. В некоторых случаях для сглаживания колебаний мощности, вызванных работой ветрогенератора, используются накопители энергии, такие как аккумуляторы или суперконденсаторы. Имеющиеся у данных приборов свойства, накапливают избыточную электроэнергии во время работы ВЭС и отдают её в сеть при необходимости.

Заключительным из рассматриваемых подходов является интеграция в систему управления энергопотреблением. Подразумевается, что современные системы управления энергопотреблением позволяют оптимизировать работу ВЭС в зависимости от текущих потребностей сети. Например, возможность регулировать скорость вращения лопастей ветрогенератора или изменять его мощность для поддержания стабильного напряжения и частоты в сети.

Существует также ряд требований к подключению объектов генерации электроэнергии на базе ВИЭ к электрической сети в мире. Среди них:

1) ограничения по загрузке оборудования в нормальных и ремонтных режимах;

2) требования к установленной мощности;

3) учёт пропускной способности электрической сети;

4) влияние на потери мощности в сети.

Данные требования были сведены в единый международный стандарт, который на момент написания диссертационной работы является самым проработанным, исчерпывающим и актуальным — это стандарт американского происхождения IEEE 1547 [19].

IEEE 1547 — это стандарт, разработанный Институтом инженеров электротехники и электроники (IEEE), который касается взаимосвязи и интероперабельности распределенных энергетических ресурсов с электроэнергетической системой. Данный стандарт был первоначально опубликован в 2003 году и с тех пор претерпевал изменения, чтобы соответствовать достижениям в области технологий использования возобновляемых источников энергии и практики сетевой интеграции.

Стандарт содержит технические требования к безопасному и надежному подключению различных типов ВИЭ, включая солнечные фотоэлектрические системы, ветряные турбины и системы хранения энергии. Набор представленных требований охватывает такие аспекты, как безопасность, качество электроэнергии, обнаружение "островков" и функции поддержки электросети. Соответствие требованиям стандарта IEEE 1547 имеет важное значение для обеспечения успешной интеграции возобновляемых источников энергии в энергосистему при сохранении стабильности и надежности системы. Регулирующие органы и коммунальные компании часто требуют соблюдения этого стандарта при подключении к электросети.

Основные разделы стандарта IEEE 1547:

1) **общие требования**. В этом разделе устанавливаются общие принципы и термины, используемые в стандарте, а также принципы интерконнекта DER с электрической сетью;

2) **технические требования к интерконнекту**. Данный раздел содержит технические требования, которым должны соответствовать DER для безопасного и надежного интерконнекта с электрической сетью. Это включает в себя требования к защите, контролю напряжения, контролю частоты, а также требования к дополнительной функциональности DER;

3) **процедуры испытаний и сертификации.** Третий раздел описывает процедуры испытаний, необходимые для проверки соответствия DER требованиям стандарта, а также процедуры сертификации;

4) **технические требования к идентификации и обнаружению разделенной сети**. Этот раздел описывает требования к системам обнаружения разделенной сети (islanding), предназначенным для предотвращения передачи электроэнергии DER на электрическую сеть в случае отключения сети;

5) **мониторинг и управление качеством энергии**. В пятом разделе описываются требования к мониторингу и управлению качеством энергии, таким как гармоники, напряжение и частота, для обеспечения соблюдения стандартов качества энергии;

6) **системы электропитания в домах и зданиях**. Заключительный раздел касается специфических требований и рекомендаций по интерконнекту DER с системами электроснабжения в домах и зданиях.

Каждый из этих разделов включает в себя подразделы и конкретные технические требования, необходимые для обеспечения безопасного и надежного интерконнекта DER с электрической сетью в соответствии с требованиями стандарта IEEE 1547.

Стандарт IEEE 1547 является одним из самых проработанных и широко принятых в индустрии из-за нескольких ключевых причин:

Широкое применение. IEEE 1547 был разработан с учетом различных типов распределенных ресурсов энергии (DER), таких как солнечные и ветряные установки, энергохранилища и другие. Этот стандарт обеспечивает гибкую архитектуру, которая может быть применена к различным типам DER и разнообразным условиям эксплуатации.

Обширный процесс разработки. IEEE 1547 был разработан с участием широкого спектра заинтересованных сторон, включая производителей оборудования, инженеров, академическое сообщество, регуляторов и операторов системы передачи. Это обеспечило включение разнообразных точек зрения и учет различных технических, экономических и правовых аспектов.

Актуализация и обновления. IEEE 1547 регулярно обновляется и пересматривается, чтобы отражать последние технологические достижения и лучшие практики в области интерконнекта DER. Это позволяет стандарту оставаться актуальным и соответствовать изменяющимся требованиям и вызовам в области распределенной генерации энергии.

Поддержка отраслевых организаций и регуляторов. IEEE 1547 получил широкую поддержку отраслевых организаций, таких как Национальная комиссия по электроэнергетике (NESC), Национальная ассоциация регулируемой утилитной комиссии (NARUC) и других. Это обеспечивает широкое признание и принятие стандарта в различных юрисдикциях.

Совместимость и гармонизация. IEEE 1547 стремится к гармонизации с другими региональными и международными стандартами, такими как UL 1741 в США и IEC 61727 в Европе. Это помогает обеспечить совместимость и согласованность требований для интерконнекта DER в различных частях мира.

Из-за вышеперечисленных причин IEEE 1547 является важным и авторитетным стандартом в области интерконнекта распределенных ресурсов

энергии, и его рекомендуется использовать как основу для разработки политики, регулирования и технических решений в этой области.

Стоит отметить, что IEEE 1547 относится к научно-техническому характеру больше, чем к инженерному. Стандарт не является законным постановлением и не обязателен, даже в США. Данный документ лишь определяет типовую структуру реализации проектов и различных видов деятельности в сфере собственной генерации, в которую, в свою очередь, уже интегрируются национальные стандарты с их конкретными параметрами и числовыми значениями.

1.4 Выводы

Основой для развития генерирующих электроэнергии объектов на базе ВИЭ является надежное, бесперебойное обеспечение потребителей электрической энергией.

Тенденция развития ВИЭ и характерные при этом изменения электрической нагрузки, обусловленная развитием регионов и их социально-экономических процессов, послужило к формированию разрешения проблем эффективного развития топливно-энергетического комплекса, а именно объектов генерации электроэнергии на основе ВИЭ.

Результатом решения поставленных проблем будут служить программы для стимулирования инвестиций субъектов отрасли, которые будут служить поставщикам электроэнергии и покрывать увеличивающийся спрос на электроэнергию и мощность. Для этого необходимо дальнейшее изучение рынка электроэнергии на базе ВИЭ и законы, которые позволят беспрепятственно внедрять электростанции на основе экологически чистых источниках электроэнергии в России. Анализируя тенденцию в энергетике России, планы и задачи на будущее, задача оптимизации мест размещения ВЭС является актуальной.

Факторы, которые необходимо учитывать при решении задачи оптимизации мест размещения ВЭС в региональных электроэнергетических системах (ЭЭС):

1) климатические условия региона;
2) географическое расположение;
3) технические характеристики генерирующего оборудования;
4) экономические факторы;
5) экологические ограничения.

Скорость и направление ветра, количество осадков, рельеф местности, наличие водных ресурсов, удалённость от населённых пунктов относятся к природным факторам. Они могут существенно влиять на эффективность работы ВЭС.

Мощность, тип, производительность и другие технические параметры определяют возможности и ограничения при размещении объектов ВЭС.

Немало важным фактором является необходимость обеспечивать достаточную мощность генерации для покрытия пиковых нагрузок и обеспечения надёжного электроснабжения потребителей.

Стоит отметить и стоимость строительства эксплуатации генерирующих объектов, тарифы на электроэнергию, налоговые льготы и другие экономические аспекты, которые могут влиять на выбор места размещения ВЭС.

Соблюдение экологических норм и требований при выборе мест для размещения объектов ВЭС заключается в том, чтобы минимизировать воздействие на окружающую среду.

Наличие дорог, линий электропередачи, подстанций и других элементов инфраструктуры может влиять на возможность и стоимость подключения генерирующих объектов к сети.

Заключительный фактор — при размещении генерирующих объектов необходимо учитывать интересы других участников рынка, таких как сетевые

организации, потребители электроэнергии и другие заинтересованные стороны.

Таким образом, решение задачи оптимизации мест размещения ВЭС требует комплексного подхода, учитывающего все вышеперечисленные факторы. Это позволит обеспечить эффективное использование ресурсов и максимальную отдачу от инвестиций в развитие возобновляемой энергетики.

2 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ МЕСТ РАЗМЕЩЕНИЯ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

2.1 Анализ существующих методов и подходов модели оптимизации размещения в энергетике

Прежде чем сформулировать задачу оптимизации мест размещения ВЭС, необходимо рассмотреть существующие методы и подходы к оптимизации размещения генерирующих объектов в энергетике.

Зарубежные примеры статей и научно-исследовательских работ на тему оптимизации размещения генерирующих объектов

Статья на тему «Placement Optimization for Renewable Energy Sources: Ontology, Tools and Wake Models» M. Yousaf и др. [20] обобщает последние научные исследования, направленные на оптимальное использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Существующие исследования классифицируются в зависимости от типа ВИЭ, целей и моделей функционирования. Для преодоления непредсказуемости и нестабильности отдельных источников ВИЭ, таких как ветровая и солнечная энергия, предлагается использовать гибридные системы ВИЭ с системами накопления энергии (ESS). В статье рассматриваются различные математические модели с разными целевыми функциями, такими как минимизация затрат, максимизация выработки электроэнергии и увеличение среднего косинусоидального КПД, а также минимизация потерь при распределении. Также обсуждаются различные модели и инструменты моделирования для оптимизации компоновки ветроэлектростанций. Описанные инструменты используются для оценки технической и финансовой жизнеспособности конкретных ВИЭ. Обзор представляет всеобъемлющий анализ современного состояния этой области и может послужить отправной точкой для дальнейших исследований. Также он может быть полезен для определения оптимального сочетания ВИЭ для конкретных географических районов с целью покрытия их энергетических потребностей.

В статье авторов Zhen-Zhen. Wu, Yi-Peng Xu и др. на тему «Optimal placement and sizing of the virtual power plant constrained to flexible-renewable energy proving in the smart distribution network» [21] целью исследования является определение оптимального местоположения и размера гибких виртуальных электростанций на возобновляемых источниках энергии (ГВЭ) в интеллектуальной распределительной сети с использованием двухуровневого процесса оптимизации. На верхнем уровне оптимизируется общее отклонение напряжения в сети и годовые эксплуатационные расходы, учитывая уравнения оптимального расхода электроэнергии переменного тока. На нижнем уровне решается задача минимизации годовых эксплуатационных и инвестиционных расходов на ВИЭ и гибкие ресурсы, представленные в ГВЭ. Далее двухуровневая задача преобразуется в одноуровневую с использованием метода Каруша-Куна-Такера и решается классическими математическими методами для получения оптимального решения. Адаптивный подход робастной оптимизации применяется для учета неопределенностей в производстве ВИЭ, ценах на энергоносители и спросе, а для решения нелинейной задачи используется алгоритм оптимизации ant-lion. Ant-lion алгоритм - это алгоритм, основанный на популяции. Этот процесс гарантирует надежное оптимальное решение с учетом оцененных условий отклика в худшем случае. Для реализации предложенной схемы используется стандартная сеть. Результаты оптимизации подтверждают превосходство и эффективность предложенного метода в улучшении экономических и технических условий сети при одновременном оптимизации размера и расположения ГВЭ с экономической точки зрения.

Использование генетического алгоритма описано в статье авторов E. Kaushik и др. на тему «Optimal Placement of Renewable Energy Generators Using Grid-Oriented Genetic Algorithm for Loss Reduction and Flexibility Improvement» [22]. В ней предлагается грид-ориентированного генетического алгоритма (GOGA), который комбинирует генетические алгоритмы и аналитические

уравнения расхода электроэнергии для оптимального планирования генераторов возобновляемой энергии (REGS) в энергосистеме. GOGA направлен на уменьшение потерь в системе и повышение её гибкости. Для этого используется уравнение Крона для оценки потерь в системе в зависимости от мощности, вырабатываемой различными генераторами. Был разработан индекс гибкости (FI), который основан на напряжении и потерях в системе, чтобы оценить увеличение гибкости. GOGA выполняет оптимизацию расположения REGS, используя операторы скрещивания, мутации и замены для генерации новых комбинаций хромосом, пока не будет найдено оптимальное решение по размеру и расположению REGS. Этот алгоритм обладает быстрой сходимостью, высокой точностью и превосходной производительностью по сравнению с обычными генетическими алгоритмами.

S. Ghosh и др. в статье на тему «Optimal sizing and placement of distributed generation in a network system» [23] предлагается простой метод оптимального определения размеров и расположения генераторов. Простой традиционный метод итеративного поиска используется в сочетании с методикой анализа потока нагрузки Ньютона-Рафсона в модифицированных системах с 6, 14 и 30 шинами стандарта IEEE. Выбор местоположения и мощности осуществлен путем перебора. В статье представлены графики иллюстрирующие, как параметры режима работы сети изменяются в зависимости от мощности и расположения источника генерации. Конечная цель работы состоит в значительном снижении как затрат, так и потерь.

Наиболее близкой к задаче оптимизации мест размещения генерирующих объектов с использованием машинного обучения подошли авторы статьи M. Mashhour, M. A. Golkar, S. M. Moghaddas Tafreshi на тему «Optimal sizing and siting of distributed generation in radial distribution network: Comparison of unidirectional and bidirectional power flow scenario» [24].

Внедрение распределенной генерации (РГ) в распределительных сетях оказывает значительное влияние как отрицательное, так и положительное на потери, в зависимости от местоположения и размера объектов РГ. В данной статье основное внимание уделяется оптимальному размещению и размерам блоков РГ с целью минимизации общих потерь электроэнергии в радиальных распределительных сетях при двунаправленном и однонаправленном перетоке электроэнергии. В качестве эффективного изучения области поиска проблемы используется усовершенствованный генетический алгоритм. Метод был реализован и протестирован в распределительной сети с 16 шинами. Результат работы показывает, что ограничение однонаправленного потока может ограничить возможности устройств РГ по минимизации потерь в сети. Целевой функцией, подлежащей минимизации, является функция потерь мощности радиальной распределительной сети.

Отечественные примеры статей и научно-исследовательских работ на тему оптимизации мест размещения генерирующих объектов

Российские учёные также рассматривали задачу оптимизации мест размещения и подключения, а также типа генерирующей установки в своих научно-исследовательских работах.

В Отечественных иследованиях в области оптимизации мест размещения и внедрения в ЭЭС объектов малой генерации был Харитонов Д. А. в работе на тему «Разработка методики выбора и рационального использования когенерационных систем в качестве источника электроэнергии на предприятии по технико-экономическим критериям» [25].

В статье анализируются когенерационные системы, функционирующие как в автономном, так и в параллельном режиме. В основе анализа лежат параметры, связанные с экономической эффективностью и надежностью обеспечения электроэнергией промышленных предприятий. После проведения исследований, был сформирован и выделен ряд плюсов

параллельного функционирования небольших генерирующих установок с электроэнергетическими системами.

Также, одним из первых, кто применил генетический алгоритм для решения задачи оптимизации размещения в Отечественных исследованиях, стал Тарасенко В.В. в работе на тему «Генетический алгоритм выбора распределенной генерации» [26-27]. В ней была обозначена и решена задача выбора количества, типа и места размещения объектов малой генерации в распределительной сети, а также выбор оборудования эксплуатации в различных ситуациях. Целевой функцией стала многопараметрическая функция затрат, возникающих при интеграции генерирующего устройства в распределительную сеть. В работе был использован генетический алгоритм. В статье было подтверждено, что использование генетических алгоритмов в данной задаче является эффективным методом, позволяющим достичь желаемого результата эффективнее за меньшее время.

Следующим из рассматриваемых методов позволяющим качественно и количественно оценить целесообразность установки объектов малой генерации является **индикативный анализ**, который был рассмотрен и представлен Ерошенко С.А. в научно-исследовательской работе на тему «Комплексная оценка целесообразности и оптимизация размещения генерирующих объектов малой мощности с использованием индикативного анализа» [28].

Индикативный анализ — это метод, который использует различные инструменты и способы для оценки технических и рабочих характеристик генераторов и их воздействия на систему передачи и распределения электрической и тепловой энергии с учётом текущей ситуации в электрических сетях. Индикатор — основной элемент этого метода, это показатель, который служит критерием оценки работы объектов системы. Его значение позволяет в достаточной мере определить обоснованность решений в технической или другой области.

Основные принципы системы индикативного анализа:

1) комплектность;
2) иерархичность;
3) вариантность;
4) соизмеримость.

Оценка целесообразности внедрения малой генерации происходит путем сопоставления индикатора или группы индикаторов с соответствующими пороговыми значениями.

Следующая статья, в которой рассматривалась задача оптимизации размещения генерирующих объектов — это «Оптимизация территориального размещения малых электростанций» Г. Петрова и др. [29].

В данной статье исследована проблема оптимизации размещения малых электростанций (ЭС) на определённой территории. При этом также решается задача по выбору оптимального сечения проводов, что позволяет минимизировать стоимость строительства линий электропередачи (ЛЭП). Также в работе сделан вывод о том, что используемые при этом методы и результаты могут быть применены к любым объектам генерации на базе ВИЭ.

В статье описывается оптимизация размещения объектов генерации на базе МГЭС. Оптимизации размещения объектов ВИЭ предлагается обеспечить при условии, что зона влияния ЭС будет ограничиваться расстоянием, стоимость передачи электроэнергии на которое путем строительства ЛЭП с учетом потерь электроэнергии будет дешевле сооружения новой станции требуемой мощности. Основным критерием данного подхода является радиус эффективности электростанции — $R_{эфф}$, который определяется на основе того, что в пределах окружности с заданным радиусом обеспечение энергией локального потребителя от уже существующей электростанции (ЭС) в её центре будет экономически выгоднее, чем строительство новой ЭС непосредственно в месте потребления.

В заключении, в данной статье предлагается метод совместной оптимизации строительства малых гидроэлектростанций (МГЭС) и линий электропередачи (ЛЭП), основанный на анализе ключевых факторов, таких как мощность электростанции, стоимость строительства и эксплуатации МГЭС и ЛЭП, сечение провода, тариф на электроэнергию, налоги и другие параметры. Этот метод позволяет определить вариант энергоснабжения потребителей, который минимизирует затраты и обеспечивает окупаемость строительства электростанции. В результате оптимизации затрат и издержек была получена формула для расчёта максимального радиуса эффективности $R_{эфф}$, которая помогает выбрать наиболее выгодное место для размещения электростанции с учётом обеспечения эффективного сечения провода ЛЭП. Само сечение провода F может быть найдено по формуле.

В большинстве исследований, описанных ранее, задачи определения оптимального местоположения и мощности решались поочередно, что объясняется сложностью самих задач. Задача оптимизации размещения включает в себя дискретные и непрерывные переменные, что делает ее нелинейной и является основным источником трудностей для многих математических методов. Методы линейного и нелинейного программирования также требуют введения определенных ограничений, для нахождения решения задачи оптимизации размещения.

2.2 Определение задачи оптимизации мест размещения ветроэлектростанций

Формулировка задачи оптимизации мест размещения ВЭС необходима для того, чтобы найти наилучшее место размещения ветровых установок.

Основным параметром для определения оптимального места размещения ВЭС будет являться F — целевая функция (objective function).

Целевая функция (F) — это функция, которую необходимо оптимизировать в рамках поставленной задачи [30-32]. Она представляет

собой критерий, по которому оценивается качество или эффективность решения. В различных областях науки и техники целевые функции могут иметь разные формы и назначения. Несколько примеров использования целевых функций:

1) математическое программирование;
2) машинное обучение;
3) оптимизация алгоритмов;
4) инженерные задачи;
5) финансовый анализ.

В каждом из этих примеров целевая функция играет ключевую роль, определяя цель оптимизации или оценки в рамках конкретной задачи.

Определение оптимального места для размещения ветроэнергетической станции (ВЭС) требует анализа различных параметров. Ниже представлены некоторые из основных параметров, которые обычно учитываются в проектах при планировании реализации ВЭС:

1) **скорость ветра**. Одним из ключевых параметров является скорость ветра в потенциальных местах установки ВЭС. Более высокие скорости ветра означают более высокий потенциал для генерации энергии;

2) **направление ветра**. Направление ветра также имеет значение для оптимальной работы ВЭС. Расположение станции так, чтобы она была выставлена к наиболее часто дующим ветрам, помогает максимизировать энергию, производимую установкой;

3) **топография местности**. Рельеф местности может существенно влиять на скорость и направление ветра. Открытые равнины или холмистые районы могут предлагать разные условия для установки;

4) **близость к электросети**. Оптимальное местоположение должно учитывать доступность существующей электрической инфраструктуры для подключения генерируемой энергии;

5) **экологические ограничения**. Некоторые места могут быть защищены по экологическим причинам, например, из-за наличия защищенных видов растений или животных;

6) **доступность земли**. Для установки ВЭС требуется значительная площадь земли. Поэтому доступность и цена земельного участка также важны;

7) **местные правовые и регуляторные ограничения**. Различные региональные и местные правила и нормативы могут ограничивать размещение ВЭС в определенных местах;

8) **инфраструктура и доступ к обслуживанию**. Удобство доступа для строительства, обслуживания и эксплуатации также является значимым фактором.

Комбинация данных параметров помогает определить оптимальное место размещения ветроэнергетической станции с целью максимизации энергетического выхода и минимизации затрат.

Сформулируем формулу целевой функции F в области задачи оптимизации мест размещения ВЭС и определим наиболее важные параметры для ее нахождения:

$$F = \sum_{i=1}^{n} a_i * x_i,$$

где x_i — технические, экономические, географические параметры, которые необходимы для нахождения целевой функции поставленной задачи оптимизации мест размещения ВЭС;

$a_{i,j}$ — весовые коэффициенты параметров x_i (см. Таблица 2);

n, m — количество параметров.

Таблица 2 — весовые коэффициенты Харрингтона [32]

Содержательное описание полезности	Числовое значение коэффициента a_i
Очень высокая	0,8 – 1,0
Высокая	0,64 – 0,8
Средняя	0,37 – 0,64
Низкая	0,2 – 0,37

Продолжение таблицы 2

Содержательное описание полезности	Числовое значение коэффициента a_i
Очень низкая	0,0 – 0,2

В рамках решения задачи поиска оптимального места размещения ветроэлектростанций с применением математического аппарата генетических алгоритмов выполняется поиск максимального значения функции:

$$F = \sum_{i=1}^{n} a_i * x_i \rightarrow max$$

Для решения поставленной задачи воспользуемся методом весовых оценок. Алгоритм использования метода описывается следующим образом:

1) формируется список параметров (x_{1-5}): каждому параметру присваивается весовой коэффициент для определения его значимости (от 0 до 1). Сумма всех весов должна быть равна 1;

2) каждому параметру проставляются веса;

3) умножаются оценки параметров на соответствующие веса и суммируются;

4) получаем значение целевой функции — F.

Параметры целевой функции ($x_1 - x_5$)

1. Первым параметром x_1 является количество ветряных установок, стандартная единица измерения — шт. Формула для нахождения определяется следующим образом: $x_1 = 1,2, \dots, n$, где n — кол-во ветровых установок. Это основной параметр для нахождения оптимального места размещения ВЭС, так как влияет на площадь, необходимую для установки объекта генерации. Чем больше установок планируется разместить на определенной территории, тем больше необходимо выделить площади под строительство. Это может потребовать более тщательного планирования расположения, чтобы обеспечить безопасное размещение установок на минимальной площади. Также, увеличение количества установок на той же площади может привести

к увеличению требований к безопасности и обслуживанию. Например, большее количество установок может требовать более сложной системы управления и обслуживания, что может повлиять на конфигурацию и размещение установок. В заключении, оптимальное размещение установок относительно друг друга и инфраструктуры, такой как дороги и электрические линии влияет на эффективное использование площади доступной земли.

2. Совокупность расходов, связанных с техническим обслуживанием, затратами на выплаты работникам, аренда земли и суммарная стоимость всех моделей ветроустановок [33] — это параметр x_2, стандартная единица измерения — руб. Формула определяется как: $x_2 = a_1 + a_2 + a_3 + a_4$, где a_1— затраты на техническое обслуживание, a_2— затраты на выплаты работникам, a_3— аренда земли, a_4— суммарная стоимость всех моделей ветроустановок. Оценка экономической части варьируется от различных факторов. Чтобы корректно оценить все расходы, необходимо для начала определиться со всеми параметрами ВЭС, от которых зависит x_2.

3. Третьим параметром x_3 для нахождения целевой функции является стоимость типов ветряных установок ($\$type$), стандартная единица измерения — руб. Формула нахождения: $x_3 = 1\$type * n, 2\$type * n, \dots, n\$type * n$, где n$type — стоимость одного типа ветровой установки, n — кол-во ветряных установок данного типа. Ветроэнергетические установки могут иметь различные конструкции и типы, которые влияют на их стоимость. Основные типы ветроэнергетических установок [34] и влияние на стоимость:

– **ветрогенераторы с горизонтальной осью (HAWT).** Это наиболее распространенный тип ветрогенераторов. Ветроколесо установлено горизонтально и вращается вокруг вертикальной оси, направленной параллельно поверхности земли. Обычно имеют три лопасти. Эффективны и экономичны в использовании. Стоимость может быть относительно низкой благодаря широкому применению и масштабированию производства. HAWT

обычно обладают высокой эффективностью, что может снизить общие эксплуатационные расходы и обеспечить более высокий доход от инвестиций;

– **ветрогенераторы с вертикальной осью (VAWT).** Ветроколесо установлено вертикально и вращается вокруг вертикальной оси. Имеют различные конфигурации, включая множество лопастей или структур в виде стержней. Также могут быть установлены на низких высотах и могут быть менее чувствительны к направлению ветра. Из-за их менее распространенного использования и более сложной конструкции, стоимость VAWT может быть выше прочих типов;

– **плавающие ветроустановки.** Установки данного типа используются на плавучих платформах, что позволяет размещать их в глубоких водах у берегов. Стоимость данного типа ветроустановок варьируется от множества факторов, таких как глубина воды, условия эксплуатации и др. В частых случаях стоимость ниже, чем VAWT и выше, чем HAWT.

– **ветроустановки с малым диаметром.** Это компактные установки с небольшим диаметром ветроколеса. Используются чаще для небольших мощностей и для установки на крышах зданий или на ограниченных территориях. Наиболее дешевый тип ветряных установок.

– Также существуют и другие типы, и конструкции ветряных установок, но описанные выше наиболее используемые в планировании и реализации ВЭС.

4. Следующим параметром x_4 будет являться площадь землеотвода, стандартная единица измерения — км^2. Формула определяется как: $x_4 =$ $=1,2,\dots,n$ где n — площадь в км^2. Землеотвод в области ВЭС — это участок земли, выделяемый под размещение самой установки, а также под инфраструктуру, необходимую для ее функционирования и обслуживания. Включает в себя площадь, занимаемую ветрогенераторами, дорогами для доступа к ним, зонами безопасности вокруг установок, а также возможные

строения для хранения оборудования и материалов. Площадь Размер землеотвода может значительно различаться в зависимости от типа и мощности установки, конфигурации местности, требований к безопасности и других факторов. В процессе проектирования ВЭС важно учитывать требования к землеотводу, чтобы обеспечить эффективную эксплуатацию установки, безопасность персонала, соблюдение нормативных требований и минимизацию воздействия на окружающую среду.

5. Последним параметром x_5 является выработка электроэнергии, стандартная единица измерения — МВт. Формула нахождения данного параметра: $x_5 = P_{type} * 1 + P_{type} * 2, \dots, P_{type} * n$, где P_{type} — мощность одного ветряного генератора выбранного типа, n — кол-во ветряных генераторов выбранного типа. Выработка электроэнергии на ветроэнергетической станции (ВЭС) зависит от нескольких факторов: скорость ветра, плотность воздуха, площадь поперечного сечения лопастей, длительность и частота ветровых порывов, размещение установки. Все эти факторы в совокупности определяют потенциал выработки электроэнергии на ветроэнергетической установке.

Исходя из количества критериев, данная задача является — многокритериальной оптимизацией.

Многокритериальная оптимизация [35-36] — это область оптимизации, в которой рассматривается одновременная оптимизация двух и более противоречивых целевых функций или критериев. В отличие от однокритериальной оптимизации, где имеется одна целевая функция и необходимо найти оптимальное решение по этой функции, в многокритериальной оптимизации целью является нахождение набора решений, не доминирующих друг друга во всех критериях. Основные характеристики многокритериальной оптимизации:

1) недоминированное решение: решение, которое не имеет улучшений по всем критериям. Такое решение называется недоминированным или Парето-оптимальным;

2) парето-оптимальность: решение, которое не может быть улучшено по одному критерию без ухудшения по другому критерию, считается Парето-оптимальным;

3) фронт Парето: множество всех Парето-оптимальных решений называется фронтом Парето;

4) методы решения: для поиска недоминированных решений в многокритериальной оптимизации могут использоваться различные методы, такие как генетические алгоритмы, методы оптимизации с использованием эволюционных стратегий, методы искусственного интеллекта и т.д;

Многокритериальная оптимизация является важным инструментом для принятия решений в условиях конфликтующих целей и требований. Она позволяет найти компромиссное решение, которое удовлетворяет различные критерии оптимальности.

Также, если критерии имеют различные единицы измерения или масштабы, необходимо привести их к одной шкале путем нормализации.

Нормализация значений — это процесс приведения различных переменных или критериев к одинаковой шкале или диапазону значений, чтобы сделать их сопоставимыми и учитываемыми при принятии решений. Нормализация значений может использоваться в различных областях, таких как статистика, многокритериальный анализ, машинное обучение и другие.

Существуют различные методы нормализации, в данной диссертационной работе воспользуемся методом глобального критерия.

Чтобы найти целевую функцию, необходимо привести все параметры к единой единице измерения. Приведение множества параметров целевой функции к единой единице измерения является важным шагом при решении

многокритериальной оптимизации, чтобы объединить различные критерии и сделать их сравнимыми.

В данной диссертационной работе воспользуемся методом нормализацией параметров. Этот метод предполагает масштабирование значений параметров в пределах от 0 до 1, от минимальной полезности, к максимальной.

Также, необходимо ввести ограничения для каждого параметра, чтобы предотвратить ситуацию, когда при заданных ограничениях решение задачи становится невозможным из-за чрезмерной конкретизации условий.

Ограничения для целевой функции могут включать следующие аспекты:

1) ограничения на переменные — целевая функция может зависеть от набора переменных, каждая из которых может быть ограничена определенным диапазоном значений. Эти ограничения могут быть заданы для каждой переменной отдельно, например, минимальное и максимальное значение;

2) допустимость решений — в некоторых задачах важно учитывать, чтобы решение соответствовало определенным условиям или требованиям. Например, в задачах планирования могут быть установлены ограничения на доступность ресурсов или последовательность технологических операций;

3) ограничения на структуру решения — в некоторых случаях, решение может быть структурировано по определенным правилам или шаблонам. В этом случае ограничения должны гарантировать соблюдение структуры решения.

Учитывая эти ограничения, генетический алгоритм может находить оптимальное или приближенное решение задачи, учитывая требования, заданные в целевой функции.

2.3 Генетический алгоритм

Для решения поставленной задачи нахождения целевой функции оптимизации мест размещения ВЭС воспользуемся **генетическим алгоритмом** [37].

Генетический алгоритм — это эвристический алгоритм поиска, основанный на принципах естественного отбора и генетики. Он используется для поиска оптимального решения задачи путем эмуляции процесса эволюции в природе.

Генетический алгоритм обычно применяется для решения задач оптимизации, когда требуется найти наилучшее или приблизительное решение задачи в условиях, когда не существует точного алгоритма или метода для решения этой задачи.

Принцип работы генетического алгоритма заключается в том, что он создает популяцию решений, которые эволюционируют и улучшаются по поколениям. Он использует операторы выбора, скрещивания, мутации и адаптации для создания новых решений на основе лучших предыдущих решений из популяции.

Генетические алгоритмы широко применяются в различных областях, таких как машинное обучение, биоинформатика, оптимизация задач и прочие.

Генетический алгоритм состоит из нескольких основных функций, которые позволяют ему проводить эволюционный процесс поиска оптимального решения задачи. Рассмотрим, какие основные функции включает в себя генетический алгоритм.

Инициализация популяции. Случайным образом создается начальная популяция индивидуальных решений (геномов), которые представляют потенциальные решения задачи.

$$\mathrm{P}(0) = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$$

где x_i — случайно сгенерированные индивиды начальной популяции размером n.

Оценка приспособленности (адаптации). Это процесс оценки качества каждого индивидуума в популяции с целью определения их пригодности для решения задачи. Таким образом, происходит отбор лучших индивидуумов для последующих поколений.

$$f(x_i) \ \forall x_i \in P(t) \ ,$$

где f — функция приспособленности, оценивающая качество каждого индивида x_i в поколении t.

Отбор. Осуществляется выборка лучших индивидуумов из текущей популяции для сохранения и использования в следующем поколении. Существуют различные методы отбора, такие как турнирный отбор, пропорциональный отбор, ранговый отбор и другие.

Скрещивание (кроссовер) — процесс создания новых индивидуумов путем комбинирования генетической информации двух (или более) родителей. Различные методы скрещивания определяют, как именно происходит комбинация генетической информации.

Пусть x_p и x_m — выбранные родители. Тогда потомки x_{c1} и x_{c2} создаются с помощью кроссовера:

$$x_{c1}, x_{c2} = crossover(x_p, x_m).$$

Мутация — это случайное изменение генетической информации в индивидууме с небольшой вероятностью. Мутация помогает избежать застревания в локальных оптимумах и способствует разнообразию в популяции:

$$x'_{c1}, x'_{c2} = mutation(x_{c1}), mutation(x_{c2}).$$

Потомки подвергаются случайным изменениям с некоторой вероятностью мутации.

Замещение определяет, какие индивиды из текущего поколения будут сохранены, а какие будут заменены новыми потомками, полученными в результате операций селекции, кроссовера и мутации:

$$\mathrm{P}(t+1) = \{x'_{c1}, x'_{c2}, \dots, \text{другие отобранные индивиды}\}.$$

Новая популяция формируется из потомков и, возможно, некоторых родителей.

Остановка. Алгоритм завершается, если достигнут критерий остановки (это может быть максимальное число поколений или же удовлетворительная приспособленность).

Приведем пример этапов реализации генетического алгоритма, при помощи блок-схема (см. Рисунок 5).

Данная блок-схема иллюстрирует, как устроен алгоритм принятия решений при использовании генетического алгоритма в программном коде на языке Python [38].

При реализации на других платформах, возможно, могут отличаться этапы, но кардинальных изменений в процессе работы ГА нет.

Описанные ниже функции взаимодействуют друг с другом в процессе эволюции популяции и постепенно приближаются к наилучшему решению задачи. Генетический алгоритм может изменять параметры этих функций для достижения оптимального решения в зависимости от конкретной задачи.

В рамках данной диссертационной работы генетический алгоритм будет применен в среде программирования Google Colab [39] на языке Python.

Блок-схема генетического алгоритма

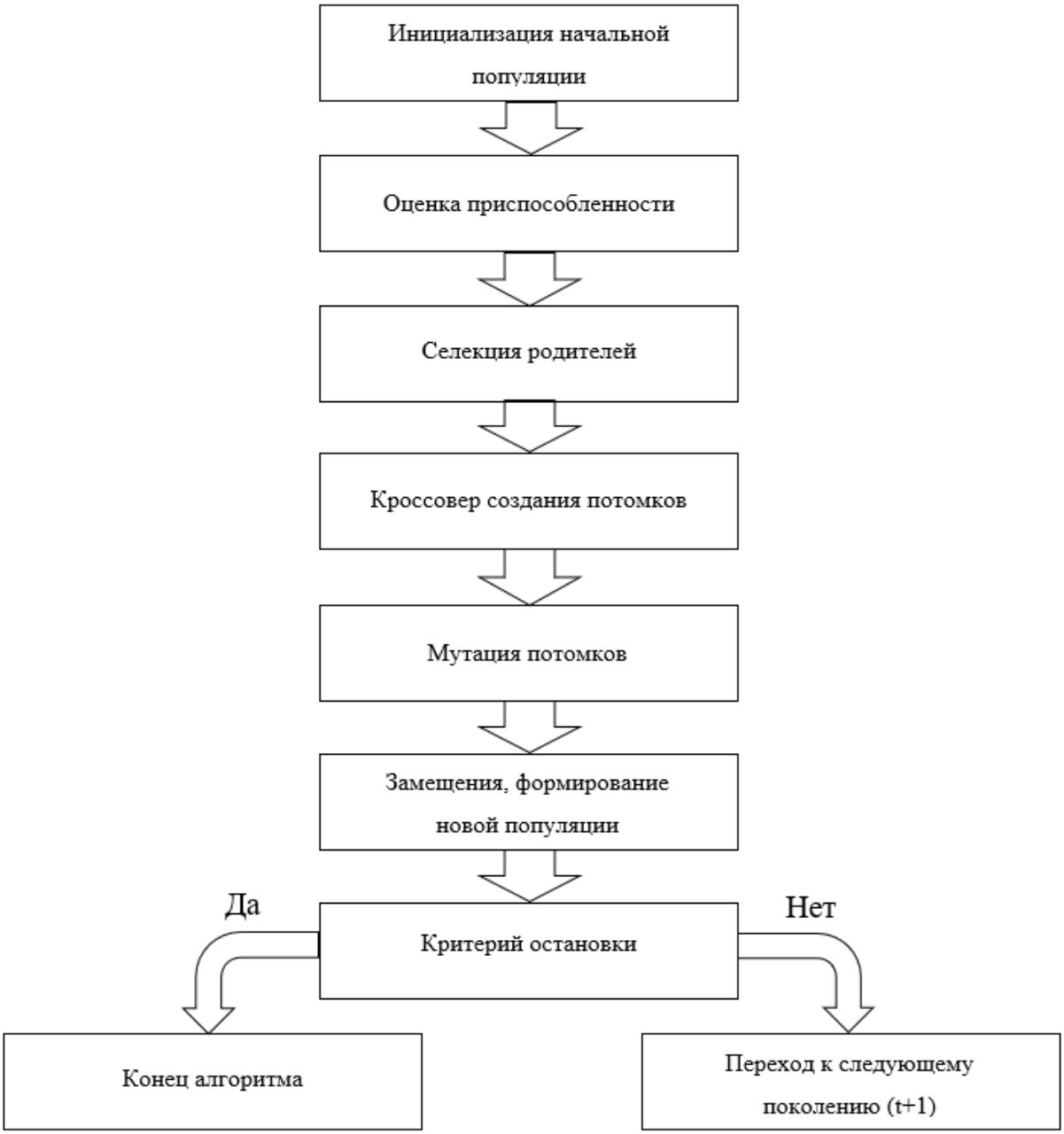

Рисунок 5 — Блок-схема генетического алгоритма

2.4 Расчетный пример использования генетического алгоритма для поиска оптимального места размещения ветроэлектростанций

Для применения генетического алгоритма к задаче оптимизации мест размещения ветроэлектростанций с учетом различных весов критериев, вам нужно будет определить функцию цели, а также функцию оценки (fitness

function), которая оценивает каждое решение (в данном случае, расположение ветроэлектростанций) на основе целевой функции.

В данной диссертационной работе воспользуемся программированием на языке Python с использованием библиотеки DEAP для реализации генетического алгоритма.

DEAP (Distributed Evolutionary Algorithms in Python) [40] — это библиотека на языке программирования Python, предназначенная для реализации различных эволюционных алгоритмов. Она предоставляет широкий спектр инструментов и функций для создания и оптимизации эволюционных алгоритмов, таких как генетические алгоритмы, эволюционные стратегии, генетическое программирование и другие.

DEAP обладает гибкой архитектурой и простотой в использовании, что делает ее популярным выбором для исследователей и разработчиков, которые хотят быстро прототипировать и реализовать свои собственные эволюционные алгоритмы.

Основные возможности DEAP включают в себя:

1) удобный интерфейс для определения функций оценки (fitness functions), операторов скрещивания (crossover operators), мутации (mutation operators) и селекции (selection operators);

2) множество встроенных эволюционных операторов, таких как одноточечное и двухточечное скрещивание, мутация по Гауссову распределению, турнирная селекция и другие;

3) возможность распараллеливания и распределенного выполнения эволюционных алгоритмов;

4) поддержка многокритериальной оптимизации и множественных типов данных;

5) гибкость и расширяемость для создания пользовательских операторов и алгоритмов.

DEAP является мощным инструментом для исследования и решения различных задач оптимизации и машинного обучения с использованием эволюционных методов.

Основные шаги реализации генетического алгоритма с помощью кода на языке Python:

1) **импорт необходимых модулей** — DEAP использует несколько основных модулей: base, creator, tools, и algorithms:

import random;

from deap import base, creator, tools, algorithms;

2) **определение функции приспособленности и генетического представления** — создаются классы для хранения значений приспособленности и индивидов (FitnessMax, Individual):

creator. create(FitnessMax, base. Fitness, weights = (1,0,));

creator. create("Individual", list, fitness = creator. FitnessMax);

3) **инициализация популяции и генетических операторов** — определяются функции для создания индивидов и популяции. Регистрируются генетические операторы (селекция, кроссовер, мутация):

toolbox. register;

4) **настройка и запуск генетического алгоритма** — создается начальная популяция. Определяются статистические функции. Запускается алгоритм **eaSimple**, который выполняет основные шаги ГА (селекция, кроссовер, мутация и замещение) на протяжении заданного числа поколений (ngen):

main − инициализирует начальную популяцию;

algorithms. eaSimple −

выполняет основные шаги генетического алгоритма .

В примере использования библиотеки DEAP для генетического алгоритма применяются несколько основных формул и операторов, которые можно формализовать следующим образом:

1) **функция приспособленности:**

Функция приспособленности оценивает качество индивида. В данном примере она максимизирует функцию:

$$F = \sum_{i=1}^{n} a_i * x_i;$$

2) **селекция (турнирная селекция):**

Турнирная селекция выбирает k случайных индивидов из популяции и выбирает лучшего среди них. Пример, k = 3:

$$P_{selected} = argmaxf(x), \text{где } x \in T;$$

$$T \subset P \text{ и } |T| = 3;$$

3) **кроссовер (двухточечный кроссовер):**

Двухточечный кроссовер выбирает две точки разреза и обменивает сегменты между двумя родителями. Пусть A и B — два родителя, и пусть точки разреза — это i и j:

Если $A = [a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_n]$ и $B = [b_1, b_1, \dots, b_i, \dots, b_j, \dots, b_n$, то потомки C и D будут:

$$C = [a_1, a_2, \dots, a_i, b_{i+1}, \dots, b_j, a_{j+1}, \dots, a_n];$$

$$D = [b_1, b_2, \dots, b_i, a_{i+1}, \dots, a_j, b_{j+1}, \dots, b_n];$$

4) **мутация (инверсия случайного бита):**

Мутация инвертирует случайный бит в бинарном представлении индивида с вероятностью p. Если x — бинарное представление индивида, и i— случайный бит, то:

$$x_i = 1 - x_i.$$

Для написания кода программы алгоритма мы определили достаточное количество данных и функций Python, приступаем к заданию параметров.

В представленном алгоритме зададим примерные 5 параметров для пяти начальных мест размещения (таблица 3).

Таблица 3 — параметры 5 мест размещения

№	Кол-во ветряных установок, шт	Совокупные затраты, млн руб	Стоимость типа, руб	Площадь землеотвода, км²	Выработка ЭЭ, МВт
1	20	1 500	50 000 000	10	120
2	25	1 800	60 000 000	15	150
3	10	1 700	100 000 000	7	68
4	20	2 400	100 000 000	14	136
5	15	1 900	80 000 000	8	102

Также необходимо расписать совокупные расходы для каждого номера (таблица 4):

Таблица 4 — совокупные затраты в год

№	Техническое обслуживание, руб	Выплаты работникам, руб	Аренда земли, руб	Суммарная стоимость ветряных установок, руб
1	150 000 000	50 000 000	300 000 000	1 000 000 000
2	100 000 000	100 000 000	100 000 000	1 500 000 000
3	200 000 000	100 000 000	400 000 000	1 000 000 000
4	150 000 000	50 000 000	200 000 000	2 000 000 000
5	250 000 000	50 000 000	400 000 000	1 200 000 000

Теперь необходимо поэтапно описать процесс нахождения целевой функции с помощью генетического алгоритма на языке Python:

1) импортируем библиотеки и определяем параметры — подключаем необходимые библиотеки и вносим значения параметров для каждого потенциального места размещения ветрогенераторов;

2) определяем вес каждого параметра (от 0 до 1, сумма должна быть не >1);

3) нормализируем параметры — функция normalize приводит значения параметров к диапазону [0, 1], чтобы сделать их сравнимыми;

4) создаём классы для целевой функции и индивидуума — используем библиотеку DEAP для создания классов FitnessMax и Individual для определения целевой функции и структуры индивидуума;

5) создаём случайного индивидуума и нормализируем — функция create_individual генерирует случайного индивидуума, и функция normalize_individual нормализует сумму его значений к 1;

6) оценка индивидуума — функция evaluate вычисляет значение целевой функции как взвешенную сумму нормализованных параметров;

7) параметры генетического алгоритма — определяем операторы для генетического алгоритма, включая создание индивидуума, оценку, кроссовер, мутацию и селекцию;

8) обновление операторов кроссовера и мутации — функции mate_and_normalize и mutate_and_normalize применяют кроссовер и мутацию с последующей нормализацией индивидуумов;

9) запуск генетического алгоритма - функция main инициализирует популяцию, задает параметры алгоритма и запускает эволюцию;

10) вывод результата — параметры всех поколений, лучший индивидуум и его значение целевой функции выводятся на экран.

В итоге, получаем 100 поколений с различными параметрами min и max, среди которых лучшим будет с минимальным параметром min и максимальным параметром max.

Сведем итоговые значения переменных в результате применения генетического алгоритма на языке Python (таблица 5).

Таблица 5 — Итоговые значения поиска оптимального варианта

gen	nevals	avg	std	min	max
0	50	0.511888	0.0652352	0.406448	0.685414
1	35	0.574023	0.0595711	0.439632	0.685414
2	23	0.613915	0.0505247	0.521434	0.72027
3	38	0.652237	0.0460486	0.532839	0.768768
4	35	0.684786	0.0343497	0.577782	0.768768
5	27	0.703831	0.0388367	0.512439	0.770806
6	25	0.732464	0.0323246	0.640671	0.784881

Продолжение таблицы 5

gen	nevals	avg	std	min	max
7	34	0.753784	0.0238673	0.669387	0.791309
8	35	0.771252	0.0160811	0.708914	0.80956
9	39	0.778308	0.022254	0.686504	0.815767
10	32	0.787698	0.0226133	0.688461	0.820339
11	28	0.802017	0.0103574	0.766218	0.823919
12	35	0.805563	0.0179838	0.721991	0.837093
13	33	0.814658	0.00814634	0.78746	0.837093
14	21	0.818311	0.0170151	0.70941	0.837093
15	36	0.822343	0.0157079	0.741498	0.837093
16	34	0.826432	0.0238987	0.708181	0.837093
17	39	0.831679	0.0175792	0.743647	0.837093
18	28	0.834995	0.00863037	0.782056	0.837093
19	35	0.834811	0.00966596	0.781507	0.837093
20	28	0.834731	0.0107969	0.769973	0.837093
21	28	0.835672	0.00794941	0.781086	0.837093
22	40	0.834241	0.00733714	0.799213	0.837093
23	36	0.834655	0.01075	0.774937	0.837093
24	40	0.829152	0.0196603	0.741517	0.837093
25	33	0.835844	0.00604528	0.796167	0.837093
26	27	0.836263	0.00518538	0.800254	0.837093
27	33	0.832835	0.0134851	0.769045	0.837093
28	41	0.828951	0.0235996	0.733845	0.837093
29	36	0.834247	0.0111168	0.76907	0.837093
30	34	0.833686	0.010412	0.7938	0.837093
31	35	0.834854	0.00832018	0.786062	0.837093
32	31	0.832637	0.0146912	0.753826	0.837093
33	35	0.83373	0.0174342	0.724544	0.837093
34	35	0.83419	0.0145534	0.749144	0.837093
35	29	0.834014	0.0139746	0.745677	0.837093
36	28	0.8365	0.00313698	0.815298	0.837093
37	25	0.833706	0.0126599	0.76499	0.837093
38	30	0.834732	0.00750061	0.797945	0.837093
39	29	0.834717	0.00861216	0.794568	0.837093
40	31	0.833614	0.0138783	0.754374	0.837093
41	34	0.834033	0.00971731	0.78299	0.837093
42	34	0.83463	0.00898966	0.787864	0.837093
43	33	0.835542	0.00667954	0.791989	0.837093
44	35	0.835235	0.00875476	0.786296	0.837093
45	33	0.8329	0.0168794	0.73181	0.837093
46	34	0.833595	0.0183093	0.71336	0.837093
47	38	0.83138	0.0158022	0.760846	0.837093
48	23	0.833539	0.0117694	0.76496	0.837093
49	37	0.832704	0.0150654	0.755828	0.837093
50	32	0.827133	0.0195481	0.759913	0.837093
51	34	0.833923	0.0110975	0.780409	0.837093
52	33	0.83435	0.0117956	0.772946	0.837093

Продолжение таблицы 5

gen	nevals	avg	std	min	max
53	31	0.832658	0.0152161	0.739714	0.837093
54	33	0.835169	0.0086712	0.781296	0.837093
55	30	0.831831	0.0172653	0.751117	0.837093
56	26	0.833586	0.0135189	0.75491	0.837093
57	37	0.830987	0.0142793	0.781688	0.837093
58	27	0.834708	0.010455	0.777373	0.837093
59	30	0.831292	0.0179621	0.74338	0.837093
60	38	0.833711	0.0154892	0.734859	0.837093
61	38	0.832623	0.012371	0.779696	0.837093
62	39	0.830703	0.0221905	0.689055	0.837093
63	35	0.836053	0.00539697	0.802203	0.837093
64	23	0.832082	0.0197533	0.724631	0.837093
65	33	0.834358	0.0112633	0.77476	0.837093
66	30	0.831563	0.0168822	0.755144	0.837093
67	30	0.836233	0.0044972	0.807754	0.837093
68	34	0.834438	0.0111062	0.766237	0.837093
69	36	0.834965	0.00868932	0.781571	0.837093
70	33	0.831073	0.0185462	0.747531	0.837093
71	33	0.835892	0.00737053	0.784879	0.837093
72	42	0.829254	0.019187	0.743899	0.837093
73	35	0.831116	0.0170382	0.758602	0.837093
74	37	0.834139	0.00869552	0.792842	0.837093
75	37	0.836778	0.00143391	0.829365	0.837093
76	33	0.832541	0.0156764	0.765821	0.837093
77	41	0.831925	0.0167707	0.749596	0.837093
78	23	0.835924	0.00805509	0.779546	0.837093
79	28	0.836115	0.00428007	0.811003	0.837093
80	28	0.834944	0.0107842	0.764443	0.837093
81	30	0.834357	0.011055	0.780614	0.837093
82	34	0.834636	0.00855365	0.796106	0.837093
83	28	0.835079	0.00748667	0.800937	0.837093
84	32	0.835373	0.00985274	0.768563	0.837093
85	36	0.832836	0.0130432	0.767061	0.837093
86	33	0.835133	0.00983192	0.771863	0.837093
87	33	0.830295	0.0211342	0.740471	0.837093
88	34	0.832043	0.0181274	0.729221	0.837093
89	40	0.835663	0.00546843	0.802808	0.837093
90	32	0.833157	0.0134861	0.765803	0.837093
91	25	0.836671	0.00295541	0.815983	0.837093
92	30	0.832377	0.0120922	0.789541	0.837093
93	35	0.83439	0.0152291	0.728445	0.837093
94	40	0.835853	0.00649797	0.793216	0.837093
95	30	0.834109	0.0125522	0.766293	0.837093
96	34	0.837048	0.000320159	0.834807	0.837093
97	41	0.831576	0.0181521	0.746731	0.837093
98	36	0.835428	0.00971559	0.768247	0.837093

Продолжение таблицы 5

gen	nevals	avg	std	min	max
99	32	0.83153	0.0184376	0.743224	0.837093
100	34	0.835266	0.00723902	0.798556	0.837093

Поколение 62 является лучшим из представленных 100 (таблица 6).

Таблица 6 — Параметры лучшего поколения

gen	nevals	avg	std	min	max
62	39	0.830703	0.0221905	0.689055	0.837093

Лучший индивидуум: [0, 0, 0, 1, 0], значение целевой функции: 0.83709.

Параметры, указанные в ответе генетического алгоритма, имеют следующие значения:

1) **gen** — поколение. Это номер текущего поколения в процессе эволюции. Генетический алгоритм работает с популяцией индивидуумов, и каждое новое поколение представляет собой новую популяцию, созданную на основе предыдущей через операции селекции, кроссовера и мутации;

2) **nevals** — количество оценок. Это количество индивидуумов, которые были оценены в текущем поколении. В каждом поколении алгоритм оценивает пригодность каждого индивидуума, чтобы определить, какие из них будут использованы для создания следующего поколения;

3) **avg** — среднее значение пригодности. Это среднее значение целевой функции для всех индивидуумов в текущем поколении. Оно показывает, насколько хорошо в среднем популяция решает задачу оптимизации;

4) **std** — стандартное отклонение пригодности. Это мера разброса значений целевой функции среди всех индивидуумов в текущем поколении. Большое стандартное отклонение указывает на значительные различия в пригодности индивидуумов, тогда как малое стандартное отклонение указывает на однородность популяции;

5) **min** — минимальное значение пригодности. Это наименьшее значение целевой функции среди всех индивидуумов в текущем поколении. В случае задачи максимизации это будет наихудший результат;

6) **max** — максимальное значение пригодности. Это наибольшее значение целевой функции среди всех индивидуумов в текущем поколении. В случае задачи максимизации это будет лучший результат, достигнутый в текущем поколении.

В нулевом поколении (gen=0) было 50 оценок (nevals=50). Средняя пригодность всех индивидуумов была 0.492217 (avg= 0.492217), стандартное отклонение пригодности было 0.0594281 (std= 0.0594281), минимальная пригодность среди всех индивидуумов была 0.36656 (min= 0.36656), а максимальная пригодность — 0.618563 (max= 0.618563).

В первом поколении (gen=1) было 31 оценка (nevals=31). Средняя пригодность увеличилась до 0.546123 (avg= 0.546123), стандартное отклонение стало 0.0504266 (std= 0.0504266), минимальная пригодность повысилась до 0.449401 (min= 0.449401), а максимальная пригодность также увеличилась до 0.645769 (max= 0.645769).

И так далее для каждого последующего поколения.

2.5 Выводы

В данной главе был предложен алгоритм для нахождения целевой функции задачи оптимизации мест размещения ВЭС. Предложен метод программного кода на языке Python с применением генетического алгоритма.

Алгоритм включает в себя следующие этапы:

1) импорт библиотек и задание параметров каждого потенциального места размещения ветрогенераторов;

2) определение веса каждого параметра;

3) нормализация параметров;

4) создание классов;

5) создание случайного индивидуума и нормализация;

6) оценка индивидуума;

7) параметры генетического алгоритма;

8) обновление операторов кроссовера и мутации;

9) запуск генетического алгоритма;

10) вывод результата.

Был получен результат разработанного алгоритма показывающий, что при заданных критериях и параметрах, будет выведен лучший индивидуум и найдено значение целевой функции (таблица 7):

Таблица 7 — Лучшая точка размещения

№	Кол-во ветряных установок, шт	Совокупные затраты, млн руб	Стоимость типа, руб	Площадь землеотвода, км^2	Выработка ЭЭ, МВт
4	20	2 400	100 000 000	14	136

Для составления кода были использованы библиотеки Python, используемые для создания генетического алгоритма и его применения, которые использует мутацию и кроссовер для определения наилучшего индивидуума.

В результате получен метод, позволяющий оптимизировать место размещения ВЭС с высокой точностью и автоматизацией процесса.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что данный метод, основанные на применение генетического алгоритма в программирование на языке Python может успешно применяться для оптимизации мест размещения ВЭС.

3 АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫБРАННЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ МЕСТА РАЗМЕЩЕНИЯ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

3.1 Географические и климатические особенности, влияющие на выработку электроэнергии на ветроэлектростанциях

Для того, чтобы проанализировать эффективность предлагаемой к размещению конфигурации, необходимо понять, от чего зависит выработка электроэнергии на ветроэлектростанции.

Первоначально, необходимо описать географические и климатические особенности, влияющие на выработку электроэнергии на ветроэлектростанциях [41].

Скорость ветра

Ветер является основным источником энергии для ветроэлектростанций. Чем выше скорость ветра, тем, соответственно, больше энергии может быть произведено. Однако слишком высокая скорость может привести к повреждениям лопастей или же другого оборудования ВЭС.

В среднем, для большинства современных ВЭС требуется скорость ветра от 3—5 м/с для начала выработки электроэнергии, хотя некоторые модели могут начинать работу при более низких скоростях.

Для достижения максимальной производительности ВЭС обычно требуют скорости ветра в диапазоне от 10 до 12 м/с. Однако важно отметить, что эти значения могут варьироваться в зависимости от конкретной модели и производителя.

Также стоит учесть, что ВЭС имеют механизмы, которые автоматически останавливают или замедляют работу турбин при слишком высокой скорости ветра, чтобы предотвратить повреждение оборудования. Это обеспечивает безопасность и долговечность работы станции.

Среднегодовая или среднемесячная скорость ветра — это усредненный показатель, рассчитанный на основе 10-летних наблюдений. В таблице 6 представлена скорость ветра на высоте 10 метров от поверхности земли. В

рассматриваемой в данной диссертационной работе, Свердловская область имеет собственные показатели интенсивность ветра по месяцам, которые были сведены и представлены в таблице 8.

Таблица 8 — Значение скорости ветра в г. Екатеринбург (Свердловская область) [42]

Месяц	Средняя скорость ветра, м/с
Январь	3,14
Февраль	3,19
Март	3,14
Апрель	3,26
Май	3,34
Июнь	3,04
Июль	2,99
Август	3,12
Сентябрь	3,25
Октябрь	3,29
Ноябрь	3,16
Декабрь	3,25
Среднее за год	**3,18**



Рисунок 6 — График средней скорости ветра по месяцам

Для наглядности построим график средней скорости ветра по месяцам в Свердловской области (рисунок 6).

Направление ветра

Роза ветров также является немало важным фактором, влияющим на выработку ЭЭ. ВЭС устанавливают так, чтобы максимально использовать преобладающее направление ветра в данной местности (таблица 9).

Таблица 9 — Усредненное направление ветра по месяцам [42]

Месяц	Усредненное направление ветра, °
Январь	237
Февраль	243
Март	247
Апрель	249
Май	255
Июнь	259
Июль	262
Август	265
Сентябрь	263
Октябрь	261
Ноябрь	258
Декабрь	255
Среднее значение за год	**254**

Высота над уровнем моря

Представленные выше таблицы относятся к измерениям на высоте 10 м от уровня земли.

Скорость ветра увеличивается с высотой над уровнем моря. Поэтому ВЭС часто строят на возвышенностях или в прибрежных районах, где ветер более сильный.

Климатические условия

Климат также влияет на работу ВЭС. Например, в регионах с частыми штормами и ураганами необходимо учитывать дополнительные меры безопасности и защиты оборудования от повреждений.

Рельеф местности

Одним из важнейших факторов, влияющих на выработку электроэнергии на ВЭС, является рельеф местности также может влиять на скорость и направление ветра.

Например, в горных районах ветер сильнее, чем на равнинах. Это связано с тем, что горы могут создавать эффект «тени» или «ветровой тени», где воздух замедляется из-за препятствий.

В основном, на зависимость скорости ветра от рельефа местности влияет уклон поверхности (таблица 10). Рассмотрим коэффициенты изменения скорости ветра в различных условиях рельефа (уклонах) и на открытом равном месте. [43]

Таблица 10 — Коэффициенты изменения скорости ветра в различных условиях рельефа

Форма рельефа		**Скорость ветра на ровном месте, м/с**	
		3-5	**6-20**
Открытое ровное место		1	1
Открытые возвышения (холмы)			
Вершины	Δh>50м	1,4-1,5 (1,6-1,8)	1,2-1,3(1,4-1,5)
Наветренные склоны крутизной 3-100	верхняя часть	1,2-1,3(1,4-1,6)	1,1-1,2(1,4-1,5)
	средняя часть	1,0-1,1 (1,0-1,1)	1,0-1,1 (1,1-1,2)
	нижняя часть	1,0 (0,8-0,9)	0,9-1,0 (1,0)
Параллельные ветру склоны крутизной 3-10º	верхняя часть	1,1-1,2 (1,3-1,4)	1,0-1,1 (1,2-1,3)
	средняя часть	0,9-1,0 (1,0-1,1)	0,8-0,9 (0,9-1,0)
	нижняя часть	0,8-0,9 (0,9-1,0)	0,7-0,8 (0,8-0,9)
Подветренные склоны крутизной 3-10º	верхняя часть	0,8- 0,9 (0,8-0,9)	1,1-1,2 (1,3-1,4)
	средняя часть	0,8-0,9 (0,9-1,0)	0,9-1,0 (1,0-1,1)
	нижняя часть	0,7-0,8 (0,8-0,9)	0,7-0,8 (0,8-0,9)
Возвышения с плоскими вершинами и пологими склонами			
Вершины, верхние части наветренных и подветренных склонов крутизной 1-3º		1,2-1,4 (1,4-1,6)	1,1-1,3 (1,4-1,5)
Средние и нижние части наветренных и параллельных ветру склонов крутизной 4-10º		1,1-1,2 (1,1-1,2)	1,1-1,2 (1,2-1,3)
Средние и нижние части подветренных склонов крутизной 4-10º		0,7-0,9 (0,9-1,0)	0,8-0,9 (0,9-1,0)
Долины, лощины, овраги			
Дно и нижние части склонов долин, лощин, оврагов	Продуваемых ветром	1,1-1,2 (1,4-1,5)	1,2-1,3 (1,4-1,5)
	Не продуваемых ветром	0,7-0,8	0,7-0,8
	Замкнутых	(0,6 и менее)	(0,6 и менее)

Продолжение таблицы 10

Форма рельефа		**Скорость ветра на ровном месте, м/с**	
		3-5	**3-5**
Средние и верхние части склонов долин, лощин, оврагов	Продуваемых ветром	1,2-1,3 (1,4-1,5)	1,1-1,2 (1,3-1,5)
	Не продуваемых ветром	0,8-0,9 (0,6-0,7)	0,8-0,9 (0,6-0,7)
	Замкнутых	0,6 и менее	0,6 и менее

Совокупность всех факторов определяет географические и климатические особенности, которые влияют на выработку электроэнергии на ветроэлектростанциях.

3.2 Выбор типов ветровых установок

Ещё одним важным фактором при расчете выработки электроэнергии ВЭС является тип ветроустановки.

Ветроэлектроустановки можно классифицировать по различным критериям, таким как:

1) **мощность:**

- малые — до 100 кВт, используются для обеспечения электроэнергией небольших объектов;
- средние — от 100 до 500 кВт, подходят для электроснабжения отдельных домов или небольших предприятий;
- крупные — более 500 кВт, применяются для снабжения электроэнергией крупных объектов или целых населённых пунктов;

2) **конструкция ротора:**

- горизонтальные — ось вращения ротора параллельна земле. Наиболее распространённый тип ВЭУ;
- вертикальные — ось вращения перпендикулярна земле. Менее распространены, но имеют ряд преимуществ, таких как независимость от направления ветра и возможность установки на ограниченной площади;

3) **количество лопастей:**

- однолопастные — обладают высокой эффективностью, но сложны в производстве и эксплуатации;
- двухлопастные — наиболее распространённый вариант, обеспечивающий хороший баланс между производительностью и надёжностью;
- многолопастные (от трёх до пяти лопастей) — обеспечивают более стабильную работу при слабом ветре, но менее эффективны при сильном ветре;

4) **тип генератора:**

- асинхронные генераторы — просты в изготовлении и обслуживании, но требуют дополнительных устройств для стабилизации напряжения и частоты;
- синхронные генераторы с постоянными магнитами — обеспечивают высокую эффективность и стабильность работы, но дороже в производстве;
- синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением — компромиссный вариант между асинхронными и синхронными генераторами.

В данной диссертационной работе, была выбрана модель ветряной турбины — N163/6.X [44], номинальной мощностью 6.8 МВт, производства компании Nordex [45], Германия.

Nordex SE — немецкая компания, специализирующаяся на производстве ветрогенераторов, основанная в 1985 году и с тех пор стала одним из ведущих мировых производителей ветроэлектроустановок.

Компания предлагает широкий спектр решений для ветроэнергетики, включая наземные и морские ветровые турбины мощностью от 2 до 7 МВт. Nordex также разрабатывает и внедряет инновационные технологии, направленные на повышение эффективности и надёжности своих установок.

Основные преимущества продукции Nordex:

1) высокая эффективность;
2) надёжность и долговечность;

3) простота монтажа и обслуживания;

4) соответствие экологическим стандартам.

В настоящее время компания имеет производственные мощности в Германии, Испании, Индии и США. Продукция Nordex экспортируется более чем в 70 стран мира.

Nordex является членом различных отраслевых ассоциаций и организаций, таких как WindEurope и World Wind Energy Association. Это позволяет компании быть в курсе последних тенденций и разработок в области ветроэнергетики и вносить свой вклад в развитие этой отрасли.

Опишем характеристики ветровой турбины Nordex модель N163/6.X в таблице 11.

Таблица 11 — Технические характеристики ветряной турбины N163/6.X

Параметр	Значение
Мощностные характеристики	
Номинальная мощность	6,8 МВт
Гибкие номинальные мощности	3,18 — 7 МВт
Начальная скорость ветра	3,0 м/с
Номинальная скорость ветра	12,5 м/с
Предельная скорость ветра	26,0 м/с
Максимальная скорость ветра	52,5 м/с
Генератор	
Тип	индукционное скользящее кольцо с двойным питанием
Частота вращения	1 836 Об/мин
Напряжение	950 В
Подключение к сети	Преобразователь частичной нагрузки с силовыми модулями IGBT
Частота сети	50/60 Гц
Ротор	
Диаметр	163 м
Кол-во лопастей	3
Частота вращения ротора, макс.	10 Об/мин
Максимальная скорость	85 м/с
Тип	Лопасть NR81.5-2 / 79,7 м

В результате выбора модели ветроустановки, описания технических характеристик модели, можем приступить к расчету эффективности

выбранных параметров для оценки эффективности разработанного алгоритма поиска целевой функции.

3.3 Расчет выработки электроэнергии

Необходимо вывести формулу для расчета вырабатываемой электроэнергии ВЭС:

$$P_{\text{ээ}} = P_{\text{ВЭУ}} * H * \text{КИУМ},$$

где $P_{\text{ВЭУ}}$ — общая мощность всех ветроэнергетических установок;

H — количество часов в году (8760 часов);

КИУМ — коэффициент использования установленной мощности.

Коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) — это отношение фактической выработки электроэнергии к потенциальной выработке при полной загрузке ветрогенераторов. Он выражается в процентах и учитывает потери энергии из-за различных факторов, таких как техническое обслуживание, погодные условия и т. д.

Для того, чтобы оценить эффективность алгоритма выбора индивидуума, необходимо рассчитать выработку ЭЭ для двух одинаковых моделей ветроустановки, но с разными параметрами x_1, x_2, x_4, x_5.

Представим таблицу, необходимую для расчета выработки ЭЭ для двух индивидуумов с 5 параметрами (таблица 12):

Таблица 12 — параметры двух точек размещения для расчета выработки ЭЭ

№	Кол-во ветряных установок, шт	Совокупные затраты, млн руб	Стоимость типа, руб	Площадь землеотвода, км^2	Выработка ЭЭ, МВт
3	10	1 700	100 000 000	7	68
4	20	2 400	100 000 000	14	136

Также приведем совокупные затраты для выбранных точек размещения (таблица 13).

Таблица 13 — совокупные затраты точек размещения №3, №4

№	Техническое обслуживание, руб	Выплаты работникам, руб	Аренда земли, руб	Суммарная стоимость ветряных установок, руб
3	200 000 000	100 000 000	400 000 000	1 000 000 000
4	150 000 000	50 000 000	200 000 000	2 000 000 000

В данном случае принимаем модель ветроустановки N163/6.X одинаковой для точек размещения №3 и №4.

$P_{\text{ВЭУ№3}}$ — 68000 кВт для №3;

$P_{\text{ВЭУ№4}}$ — 136000 кВт для №4;

H — количество часов в году (8760 часов);

КИУМ — принимаем значение 0,25 для двух индивидуумов.

В таком случае формула для расчета выработки ЭЭ для точки размещения №3 выглядит следующим образом:

$$P_{\text{ээ№3}} = (68000) * 8760 * 0{,}25 = 148920000 \frac{\text{кВт}}{\text{ч}} \text{ в год.}$$

Расчет выработки ЭЭ для №4:

$$P_{\text{ээ№4}} = (136000) * 8760 * 0{,}25 = 297840000 \frac{\text{кВт}}{\text{ч}} \text{ в год.}$$

Переведем выработку ЭЭ в МВт/ч в год:

$$P_{\text{ээ№3}} = 148920 \frac{\text{МВт}}{\text{ч}} \text{ в год;}$$

$$P_{\text{ээ№4}} = 297840 \frac{\text{МВт}}{\text{ч}} \text{ в год;}$$

$$\Delta_{\text{ЭЭ}} = \frac{297840}{148920} = 2.$$

Как можно заметить, выработка ЭЭ при варианте №4 больше в 2 раза, однако совокупные затраты (x_2) — выше всего 700 000 000 руб. при одинаковой модели ветроустановки. Однако, прочие расходы выше в варианте №3 на 300 000 000 руб., что, следовательно, при выработке ЭЭ больше в 2 раза в варианте №4 имеет лучшие условия размещения.

Данные расчеты доказывают эффективность разработанного алгоритма оптимизации мест размещения ВЭС.

3.4 Выводы

В данной главе был представлен расчет выработки электроэнергии для двух индивидуумов с одинаковой моделью ветроустановки.

Для оценки эффективности алгоритма выбора лучшей точки размещения были рассчитаны выработки электроэнергии (ЭЭ) для двух вариантов ВЭС с различными параметрами.

Результат показал, что выработка ЭЭ у №4 выше в 2 раза, чем у №3. Однако, разность совокупных расходов

Для двух моделей ветроустановок с номинальной мощностью 68000 кВт и 136000 кВт были выполнены расчеты:

- точка размещения №3: $P_{ээ№3} = 148920 \frac{\text{МВт}}{\text{ч}}$ в год;
- точка размещения №4: $P_{ээ№4} = 297840 \frac{\text{МВт}}{\text{ч}}$ в год.

Выработка электроэнергии для точки размещения №4 оказалась в 2 раза больше по сравнению с точкой размещения №3: $\Delta_{ЭЭ} = \frac{297840}{148920} = 2$. При этом совокупные затраты для индивидуума №4 выше всего на 700 000 000 рублей, что свидетельствует о высокой эффективности разработанного алгоритма оптимизации мест размещения ВЭС.

Проведенные расчеты и анализ показывают, что правильно выбранное расположение и параметры ветроустановок существенно влияют на выработку электроэнергии. Формула, учитывающая номинальную мощность, количество часов в году и коэффициент использования установленной мощности, позволяет оценить годовую выработку электроэнергии с высокой точностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными результатами выполнения выпускной квалификационной работы магистра являются:

1) обоснована важность разработки методов оптимизации мест размещения ВЭС, учитывая растущую долю возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергетических системах и необходимость повышения их эффективности;

2) выбраны основные параметры, влияющие на размещение ВЭС, что позволило более точно подходить к вопросам оптимизации;

3) проведен детальный анализ проблем и существующих методов оптимизации размещения ВЭС и других генерирующих объектов на базе ВИЭ. Это позволило выявить недостатки текущих подходов и обосновать необходимость новых методов;

4) на основании практических расчетов был разработан новый метод оптимизации, основанный на генетических алгоритмах, который позволяет учесть множество факторов и параметров, влияющих на эффективность размещения ВЭС. Генетический алгоритм показал высокую точность и эффективность в нахождении оптимальных решений по размещению ВЭС;

5) проведён анализ географических и климатических особенностей, влияющих на выработку электроэнергии на ВЭС, что позволило определить ключевые параметры для оптимизации;

6) реализован расчетный пример, демонстрирующий эффективность использования генетических алгоритмов для поиска оптимальных мест размещения ВЭС;

7) разработанный метод может быть применён для практического размещения ВЭС в различных регионах, учитывая климатические и географические условия. Методика может быть адаптирована и использована для оптимизации размещения других типов объектов ВИЭ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Global Wind Report 2024 // URL: https://gwec.net/global-wind-report-2024/ (дата обращения: 10.05.2024).
2. Филиппов С. Новая технологическая революция и требования к энергетике // Форсайт. 2018. Т. 12, № 4.
3. Achweer A. Impact of Increasing Contribution of Dispersed Generation on the Power System // CIGRÉ WG 37.23, CIGRE Publications, Final report. 1999.
4. International Energy Agency (IEA). Distributed generation in liberalized electricity markets. OECD, 2002. 124 p.
5. ENTSO-E. Definitions and Acronyms // European network of transmission system operators for electricity (ENTSO-E). URL: https://www.entsoe.eu/Pages/default.aspx (дата обращения: 15.05.2024).
6. Ackermann T. Distributed generation: a definition / T. Ackermann, G. Anders-son, L. Söder // Electric Power Systems Research. 2001. № 57. P. 195 204.
7. Об электроэнергетике: Федер. закон от 26 марта 2003 г. № 35-ФЗ: принят Гос. Думой 21 февр. 2003 г.: одобрен Советом Федерации 12 марта 2003 г.: ред. от 29.12.2017. Российская газета, 2003. № 60.
8. Устройство и принцип работы ветрогенератора // Компания «Комбител» // URL: https://www.kombitel.ru/catalog/alternative/vetrogeneratory/~-ustroystvo-i-printsip-rabotyi-vetrogeneratora/ (дата обращения: 17.05.2024).
9. WWEA Half-year Report 2023 // WWEA. URL: https://wwindea.org/wwea-half-year-report-2023-additional-momentum-for-windpower-in-2023 (дата обращения: 17.05.2024).
10. Ветрогенераторные электростанции (ВЭС) // Компания «Энерготрейд». URL: https://energotrade.su/blog/windstations.htm (дата обращения 17.05.2024).
11. Об основных направлениях государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе

использования возобновляемых источников энергии на период до 2024 года: Распоряжение Правительства РФ от 08.01.2009 № 1-р (ред. от 19.07.2019). URL: https://www.garant.ru/ (дата обращения: 18.05.2024). Режим доступа: СПС Гарант. Текст: электронный.

12. Постановление Правительства РФ от 28 мая 2013 г. № 449 (ред. от 27 сентября 2018 г.) «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности» (вместе с «Правилами определения цены на мощность генерирующих объектов, функционирующих на основе возобновляемых источников энергии»). Режим доступа: СПС Гарант, URL: https://www.garant.ru/ (дата обращения: 18.05.2024).

13. Возобновляемая энергетика в России и мире // Минэнерго России. URL: https://rosenergo.gov.ru/ (дата обращения: 18.05.2024).

14. Список ветряных электростанций России // Alterra винд энерджи. URL: https://npk-alterra.com/posts/https-npk-alterra-nethouse-ru-posts-editor-posts-item (дата обращения: 20.05.2024).

15. Рынок возобновляемой энергетики РФ: текущий статус и перспективы развития. Часть 1 // СОК. 2023. №4. URL: https://www.c-o-k.ru/articles/rynok-vozobnovlyaemoy-energetiki-rf-tekuschiy-status-i-perspektivy-razvitiya-chast-1 (дата обращения: 20.05.2024).

16. Постановление Правительства РФ от 4 мая 2012 г. № 442 (ред. от 22 июня 2019 г.) «О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии» (вместе с «Основными положениями функционирования розничных рынков электрической энергии», «Правилами полного и (или) частичного ограничения режима потребления электрической энергии»). Режим доступа: СПС Гарант, URL: https://www.garant.ru/ (дата обращения: 20.05.2024).

17. 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». Режим доступа: СПС Гарант, URL: https://www.garant.ru/ (дата обращения: 22.05.2024).

18. Хусаинов Б. Р., Сагадеев В. В. Подключение возобновляемых источников энергии к трехфазной системе энергоснабжения // Вестник Казанского технологического университета. 2022.

19. IEEE 1547: Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces [Электронный ресурс]. URL: https://sagroups.ieee.org/scc21/ (дата обращения: 22.05.2024).

20. M. Y. Khan, M. Ali, S. Qaisar, M. Naeem, C. Chrysostomou and M. Iqbal, "Placement Optimization for Renewable Energy Sources: Ontology, Tools, and Wake Models // 2020. *IEEE Access*, vol. 8.

21. Zhen-Zhen Wu, Yi-Peng Xu, Zhi-Lin Cheng, Hong-Wei Sun, Behnaz Papari, Seyed Sajad Sajadi, Farah Qasim, Optimal placement and sizing of the virtual power plant constrained to flexible-renewable energy proving in the smart distribution network, Sustainable Energy Technologies and Assessments // 2022. Volume 49, 101688, ISSN 2213-1388. URL: https://www.mdpi.com/1996-1073/15/5/1863 (дата обращения: 25.05.2024).

22. Kaushik, E.; Prakash, V.; Mahela, O.P.; Khan, B.; Abdelaziz, A.Y.; Hong, J.; Geem, Z.W. Optimal Placement of Renewable Energy Generators Using Grid-Oriented Genetic Algorithm for Loss Reduction and Flexibility Improvement. Energies // 2022. URL: https://doi.org/10.3390/en15051863 (дата обращения: 25.05.2024).

23. Sudipta Ghosh. Optimal sizing and placement of distributed generation in a network system / Sudipta Ghosh, S. P. Ghoshal, Saradindu Ghosh // Int. Journal of Electrical Power Energy Systems // 2010. Vol.32.

24. Mashhour M. Optimal sizing and siting of distributed generation in radial distribution network: Comparison of unidirectional and bidirectional power flow scenario / M. Mashhour, M. A. Golkar, S. Tafreshi // 2009. IEEE Bucharest PowerTech.

25. Харитонов Д. А. Разработка методики выбора и рационального использования когенерационных систем в качестве источника электроэнергии на предприятии по технико-экономическим критериям: спец. 05.09.03 Электротехнические комплексы и системы»: дис. канд. техн. наук / Харитонов Дмитрий Александрович; Моск. энергет. ин-т. Москва, 2007. 148 с.

26. Тарасенко В. В. Генетический алгоритм выбора распределенной генерации / В.В. Тарасенко // Вестник Южно-Уральского Государственного Университета. Серия: Энергетика. 2010. вып. 13. №14(190). с. 15-19.

27. Тарасенко В. В. Оптимизация развития и функционирования системы энергоснабжения с распределённой генерацией: спец. 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы»: дис. канд. техн. наук: / Тарасенко Виктор Викторович ; Ур. федер. ун-т им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. Челябинск, 2012. 223 с.

28. Stanislav A. Eroshenko, Alexandra I. Khalyasmaa, Stepan A. Dmitriev. Technical feasibility of distributed generation network connection // 3rd/2013 International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development (EESD 2013) // 2013. Shanghai, China.

29. Оптимизация территориального размещения электростанций // G. Petrov // URL: https://www.researchgate.net/publication/354447322_Petrov_Optimizacia_territorialnogo_razmesenia_elektrostancij (дата обращения: 25.05.2024).

30. Барбаков Олег Михайлович, Гаврин Александр Сергеевич Целевая функция в системе управления // Вестник ЧелГУ. 2014. №24 (353). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tselevaya-funktsiya-v-sisteme-upravleniya (дата обращения: 26.05.2024).

31. Продюсерство. Управленческие решения: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальностям «Продюсерство кино и телевидения», «Продюсерство» и другим кинематографическим специальностям / под ред. В.С. Малышева, Ю.В. Криволуцкого. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2017- 376 с. -(Серия «Медиаобразование»). - ISBN 978-5-238-02318-2. Текст: электронный. URL: https://znanium.com/catalog/product/1028893 (дата обращения: 26.05.2024).

32. Евдокимова О.В., Марков В.В., Курнакова О.Л. // Методика проектирования рецептур инновационных продуктов с использованием обобщённой функции желательности харрингтона // Ползуновский вестник. 2015. №2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-proektirovaniya-retseptur-innovatsionnyh-produktov-s-ispolzovaniem-obobschyonnoy-funktsii-zhelatelnosti-harringtona (дата обращения: 26.05.2024).

33. Стоимость строительства ветряной электростанции // ESFC Investment Group. URL: https://esfccompany.com/articles/vetroenergetika/stoimost-stroitelstva-vetryanoy-elektrostantsii/ (дата обращения: 26.05.2024).

34. Даниленко А.И., Бекиров Э.А., Воскресенская С.Н., Алькаата А. Анализ энергетических характеристик ВЭУ usw 56-100 с новыми и штатными лопастями по результатам испытаний в составе Мирновской ВЭС // Строительство и техногенная безопасность. 2018. №13 (65). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-energeticheskih-harakteristik-veu-usw-56-100-s-novymi-i-shtatnymi-lopastyami-po-rezultatam-ispytaniy-v-sostave-mirnovskoy-ves (дата обращения: 26.05.2024).

35. Тятюшкин А.И. Многометодные алгоритмы оптимизации управления в сложных прикладных задачах // Sciences of Europe. 2020. №52-1 (52) [Электронный ресурс]. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/mnogometodnye-algoritmy-optimizatsii-upravleniya-v-slozhnyh-prikladnyh-zadachah (дата обращения: 06.06.2024).

36. Богданова П.А., Сахаров Д.М., Васильева Т.В. Обзор методов многокритериальной оптимизации в задачах принятия решений // Инновационные аспекты развития науки и техники. 2021. №6 [Электронный ресурс]. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-metodov-mnogokriterialnoy-optimizatsii-v-zadachah-prinyatiya-resheniy (дата обращения: 29.05.2024).

37. Панченко Т.В. Генетические алгоритмы [Текст]: учебно-методическое пособие / под ред. Ю.Ю. Тарасевича. Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2007. 87 [3] с.

38. Гришков Д.Ю., Аусилова Н.М. Язык высокого уровня программирования Python // НИР/S&R. 2022. №1 (9) [Электронный ресурс]. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/yazyk-vysokogo-urovnya-programmirovaniya-python (дата обращения: 29.05.2024).

39. ПО GoogleColab: офиц. сайт [Электронный ресурс]. URL: https://colab.research.google.com/ (дата обращения: 30.05.2024).

40. DEAP documentation // Project Homepage [Электронный ресурс]. URL: https://deap.readthedocs.io/en/master/ (дата обращения: 30.05.2024).

41. Шакиров В.А., Артемьев А.Ю. Выбор площадки размещения ветроэлектростанции с использованием компьютерного моделирования рельефа местности и ветрового потока // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 11. С. 133–143. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-11-133-143.

42. Значение направления и скорости ветра в г. Екатеринбург (Свердловская область) // Energy Альтернативная энергия [Электронный ресурс]. URL: https://www.betaenergy.ru/windspeed/ekaterinburg/ (дата обращения: 01.06.2024).

43. Иракозе Н. Микроклиматические особенности региона Бурунди по метеорологическим показателям: дис. студ. Санкт-Петербург, 2019. 53 с.

44. Nordex N163/6.X // Wind-turbine-models [Электронный ресурс]. URL: https://en.wind-turbine-models.com/turbines/2341-nordex-n163-6.x (дата обращения: 01.06.2024).

45. Nordex // Nordex SE [Электронный ресурс]. URL: https://www.nordex-online.com/en/ (дата обращения: 01.06.2024).

ПРИЛОЖЕНИЕ А.

ПРОГРАММНЫЙ КОД ОПТИМИЗАЦИИ МЕСТ РАЗМЕЩЕНИЯ ВЕТРОЭОЕКТРОСТАНЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

```
import random
import numpy as np
from deap import base, creator, tools, algorithms

# Примерные значения параметров для каждого потенциального места
размещения
# [количество ветроустановок, совокупные затраты, стоимость типа ветрянной
установки, площадь землеотвода, выработка ЭЭ]
locations = np.array([
    [20, 15000000000, 50000000, 10, 120],
    [25, 18000000000, 60000000, 15, 150],
    [10, 17000000000, 100000000, 7, 68],
    [20, 24000000000, 100000000, 14, 136],
    [15, 19000000000, 80000000, 8, 102]
])

# Веса критериев (важность каждого критерия), все положительные, так как
максимизируем все критерии
weights = np.array([0.4, 0.2, 0.2, 0.1, 0.1])

# Нормализация параметров (приведение значений параметров к диапазону [0,
1])
def normalize(matrix):
    return (matrix - np.min(matrix, axis=0)) / (np.max(matrix, axis=0) -
np.min(matrix, axis=0))

# Нормализованные параметры
normalized_locations = normalize(locations)

# Создание класса для целевой функции (FitnessMax) с одним критерием
оптимизации (максимизация)
creator.create("FitnessMax", base.Fitness, weights=(1.0,))

# Создание класса индивидуума (Individual) на основе списка с присвоенной
фитнесс-функцией (FitnessMax)
creator.create("Individual", list, fitness=creator.FitnessMax)

# Генерация случайного индивидуума
def create_individual():
```

```
    # Создаем случайного индивидуума, состоящего из значений в диапазоне
[0, 1]
    ind = [random.uniform(0, 1) for _ in range(len(locations))]
    # Нормализуем индивидуума, чтобы сумма значений была равна 1
    return normalize_individual(ind)

# Нормализация индивидуума (сумма значений равна 1)
def normalize_individual(ind):
    total = sum(ind)
    if total > 0:
        # Возвращаем нормализованные значения, ограниченные диапазоном [0,
1]
        return [max(0, min(x / total, 1)) for x in ind]
    else:
        # Если сумма равна 0, распределяем значения равномерно
        return [1 / len(ind) for _ in ind]

# Оценка индивидуума
def evaluate(individual):
    # Нормализуем индивидуума
    normalized_individual = normalize_individual(individual)
    # Вычисляем значение целевой функции как взвешенную сумму
нормализованных параметров
    return (np.sum(weights * np.dot(normalized_individual,
normalized_locations)),)

# Параметры генетического алгоритма
toolbox = base.Toolbox()
# Регистрация функции для создания индивидуума
toolbox.register("individual", tools.initIterate, creator.Individual,
create_individual)
# Регистрация функции для создания популяции
toolbox.register("population", tools.initRepeat, list, toolbox.individual)
# Регистрация функции для оценки индивидуума
toolbox.register("evaluate", evaluate)
# Регистрация оператора кроссовера (смешивание генов с коэффициентом
alpha=0.5)
toolbox.register("mate", tools.cxBlend, alpha=0.5)
# Регистрация оператора мутации (гауссово распределение с mu=0, sigma=0.1,
вероятностью indpb=0.2)
toolbox.register("mutate", tools.mutGaussian, mu=0, sigma=0.1, indpb=0.2)
# Регистрация оператора селекции (турнирный отбор с размером турнира 3)
toolbox.register("select", tools.selTournament, tournsize=3)

# Нормализация после кроссовера
def mate_and_normalize(ind1, ind2):
    # Применяем кроссовер
    tools.cxBlend(ind1, ind2, alpha=0.5)
    # Нормализуем потомков
```

```
    ind1[:] = normalize_individual(ind1)
    ind2[:] = normalize_individual(ind2)
    return ind1, ind2

# Нормализация после мутации
def mutate_and_normalize(individual):
    # Применяем мутацию
    tools.mutGaussian(individual, mu=0, sigma=0.1, indpb=0.2)
    # Нормализуем индивидуума
    individual[:] = normalize_individual(individual)
    return individual,

# Регистрация модифицированных операторов кроссовера и мутации
toolbox.register("mate", mate_and_normalize)
toolbox.register("mutate", mutate_and_normalize)

# Запуск генетического алгоритма
def main():
    # random.seed(42)  # Убираем фиксированное значение seed для большей
случайности
    population = toolbox.population(n=50)  # Создаем начальную популяцию
из 50 индивидуумов
    ngen = 100  # Количество поколений
    cxpb = 0.5  # Вероятность кроссовера
    mutpb = 0.3  # Вероятность мутации

    # Статистика для отслеживания процесса эволюции
    stats = tools.Statistics(lambda ind: ind.fitness.values)
    stats.register("avg", np.mean)  # Среднее значение пригодности
    stats.register("std", np.std)   # Стандартное отклонение пригодности
    stats.register("min", np.min)   # Минимальное значение пригодности
    stats.register("max", np.max)   # Максимальное значение пригодности

    # Запуск генетического алгоритма с фиксированным числом поколений
(ngen)
    population, logbook = algorithms.eaSimple(population, toolbox, cxpb,
mutpb, ngen, stats=stats, verbose=True)

    return population, logbook

if __name__ == "__main__":
    population, logbook = main()

    # Выбор лучшего индивидуума из популяции
    best_individual = tools.selBest(population, 1)[0]
    print("Лучший индивидуум:", best_individual)
    # Вывод значения целевой функции для лучшего индивидуума
    print("Значение целевой функции:", evaluate(best_individual)[0])
```