

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский технологический университет
«МИСИС»

На правах рукописи

Гусев Глеб Николаевич

**ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ
ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОГО
РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ**

Специальность: 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – канд. техн. наук Кутепов Антон Григорьевич

Москва – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПОДХОДЫ К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ВИЭ В МИРОВОЙ И РОССИЙСКОЙ ПРАКТИКЕ.....	12
1.1. История становления и планы развития возобновляемой энергетики.....	12
1.2. Эффективность использования ВИЭ в России и в мире.....	15
1.3. Оценка проблематики наиболее распространённых архитектур ВИЭ-генерации.....	17
1.4. Обзор современных методов управления технологическими установками на основе ВИЭ	21
1.5. Выводы по главе 1.....	23
ГЛАВА 2. МЕТОДИКИ ФОРМИРОВАНИЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ.....	25
2.1. Исходные положения.....	25
2.2. Методика формирования стохастических значений входных параметров силового преобразователя электротехнической системы на основе ресурсов Солнца	26
2.2.1. Расчет энергетического потенциала ресурсов Солнца	26
2.2.2. Метод формирования стохастических значений входных параметров силового преобразователя на основе ресурсов Солнца ...	34
2.3. Методика формирования стохастических значений входных параметров силового преобразователя электротехнической системы на основе ресурсов ветра.....	37
2.3.1. Расчет энергетического потенциала ресурсов ветра	37
2.3.2. Метод формирования стохастических значений входных параметров силового преобразователя на основе ресурсов ветра	46
2.4. Выводы по главе 2.....	49

ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СИЛОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ.....	51
3.1. Формирование стохастических значений входных параметров силового преобразователя электротехнической системы на основе ресурсов Солнца.....	51
3.2. Разработка математической модели адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности силового преобразователя электротехнической системы с ВИЭ.....	63
3.3. Разработка имитационной модели центрального сетевого солнечного инвертора с адаптивным регулированием реактивной мощности в программной среде MATLAB/Simulink	70
3.4. Анализ результатов моделирования центрального сетевого солнечного инвертора с адаптивным регулированием реактивной мощности	78
3.5. Выводы по главе 3.....	82
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ MASTERSCADA И ЕЁ ВЕРИФИКАЦИЯ В УСЛОВИЯХ ОПЫТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ.....	84
4.1. Исходные положения.....	84
4.2. Разработка компьютерной модели адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности в программной среде MASTERSCADA	84
4.3. Апробация компьютерной модели адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности центрального сетевого солнечного инвертора на СЭС «Гафурийская»	87
4.4. Выводы по главе 4.....	96
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	98
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	102
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	108
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	109
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	111
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	126

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью повышения надёжности и эффективности электроснабжения потребителей, в том числе находящихся вне централизованных энергетических систем. В современных условиях одним из наиболее целесообразных подходов к решению данной задачи является внедрение электротехнических систем, функционирующих на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), что особенно актуально для удалённых и труднодоступных территорий.

Развитие возобновляемой энергетики в России тесно связано с научными трудами ведущих отечественных исследователей, среди которых особое значение имеют работы П.П. Безруких, Н.И. Воропая, В.В. Елистратова, О.С. Поппеля, Д.С. Стребкова, В.Г. Николаева, В.И. Виссарионова, М.Г. Тягунова, В.М. Андреева, В.Е. Фортова, Б.В. Лукутина, В.З. Манусова, Е.В. Соломина, В.И. Велькина и других учёных. Исследования вышеуказанных ученых охватывают широкий спектр направлений – от фундаментальных основ генерации «зелёной» энергии до прикладных решений в области её внедрения в энергетическую инфраструктуру. В настоящее время задачи, связанные с адаптацией ВИЭ-систем к изменяющимся условиям эксплуатации, в частности – с разработкой и обоснованием применения адаптивных алгоритмов регулирования реактивной мощности, учитывающих нестабильность входных параметров ВИЭ и особенности электроснабжения автономных потребителей, являются актуальными.

Развитие электротехнических систем с возобновляемыми источниками энергии сопровождается ростом мощности силовых преобразователей. В электротехнических системах преобразователь формирует допустимые границы напряжения, регулирует коэффициент мощности и определяет коэффициент использования установленной мощности.

Особенностью возобновляемых источников энергии является и стохастический характер значений их параметров, обуславливающих формирование выходных параметров силового преобразователя. Вариации

постоянного напряжения на входе преобразователя приводят к изменению режима преобразования энергии и требуют адаптивного регулирования реактивной мощности.

Существующие алгоритмы регулирования в электротехнических системах с возобновляемыми источниками энергии преимущественно ориентированы на детерминированные ограничения, что не позволяет обеспечить устойчивость режима при стохастических входных воздействиях. Данный вопрос требует применения эволюционных алгоритмов, в том числе Fuzzy Particle Swarm Optimization (FPSO), который применяется в контроллерах для отслеживания точки максимума мощности (MPPT).

В связи с этим разработка метода формирования стохастических значений входных параметров силового преобразователя и адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности силового преобразователя являются актуальными задачами исследований.

Объектом исследования является электротехническая система с возобновляемыми источниками энергии.

Предметом исследования являются режимы электротехнической системы с возобновляемыми источниками энергии.

Идея работы заключается в том, что обеспечение рациональных режимов электротехнических систем с возобновляемыми источниками энергии возможно на основе разработки и внедрения адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности.

Цель диссертационной работы заключается в обосновании рациональных режимов электротехнических систем с возобновляемыми источниками энергии на основе адаптивного регулирования реактивной мощности.

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

1. Разработать метод формирования стохастических значений входных параметров силового преобразователя с применением вероятностных моделей возобновляемых источников энергии.

2. Разработать математическую модель адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности силового преобразователя.

3. Разработать имитационную модель силового преобразователя электротехнической системы с возобновляемыми источниками энергии для моделирования режимов работы силового преобразователя.

4. Разработать компьютерную модель адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности с экспериментальной её верификацией в условиях опытной эксплуатации.

Научная новизна исследования заключается в:

1. разработке метода формирования стохастических значений входных параметров силового преобразователя, обеспечивающего переход от непрерывных вероятностных характеристик возобновляемых источников энергии к непрерывным временным рядам электрических параметров фотоэлектрических модулей и ветроэнергетических установок;

2. разработке математической модели адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности силового преобразователя, учитывающего стохастическую природу возобновляемых источников энергии и выходные параметры преобразователя;

3. создана имитационная модель центрального сетевого солнечного инвертора, воспроизводящая работу адаптивного алгоритма и позволяющая исследовать режимы электротехнической системы с возобновляемыми источниками энергии;

4. разработана компьютерная модель адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности, позволяющая оценить устойчивость режимов электротехнической системы с возобновляемыми источниками энергии при колебаниях входного напряжения.

Практическая значимость работы заключается в разработке универсального подхода к проектированию электротехнических систем с возобновляемыми источниками энергии с учётом не только активной, но и реактивной составляющей мощности, что особенно актуально в условиях

нестабильности электроснабжения. Полученные результаты могут быть применены при проектировании электротехнических систем с возобновляемыми источниками энергии для автономных и удалённых объектов, малых населённых пунктов.

Результаты диссертационной работы использованы на предприятии ООО «Парус электро» при разработке первого отечественного центрального сетевого солнечного инвертора мощностью 1,5 МВт. Метод формирования стохастических значений входных параметров силового преобразователя и адаптивный алгоритм регулирования реактивной мощности использованы при сервисной поддержке солнечных электростанций суммарной установленной мощностью свыше 300 МВт.

Компьютерная модель адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности может быть использована при проектировании силовых преобразователей электротехнических систем с возобновляемыми источниками энергии, в том числе в условиях удалённых от централизованного электроснабжения районов.

Методы исследований. Для достижения поставленных задач исследования использованы фундаментальные положения теории электротехники и силовой электроники, а также современные методы определения энергетических характеристик возобновляемых источников энергии. В частности, применялись методы определения потенциала солнечной и ветровой энергии на основе вероятностных моделей и статистических данных, включающих ряды значений климатических параметров и вероятностные распределения интенсивности ресурсов. Для анализа режимов электротехнических систем с возобновляемыми источниками энергии применялось математическое, имитационное и компьютерное моделирование. В качестве основного инструмента реализации математической модели применялся программный комплекс Matlab/Simulink, а для компьютерного моделирования адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности в реальном времени – MasterSCADA.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод формирования стохастических значений входных параметров силового преобразователя электротехнической системы с возобновляемыми источниками энергии, отличающийся тем, что обеспечивает переход от непрерывных вероятностных характеристик возобновляемого источника энергии к непрерывным временным рядам электрических параметров фотоэлектрических модулей и ветроэнергетических установок.

2. Математическая модель адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности силового преобразователя, которая в отличие от известных, учитывает стохастическую природу возобновляемых источников энергии и значения выходных параметров силового преобразователя.

3. Имитационная модель центрального сетевого солнечного инвертора, отличающаяся от существующих тем, что воспроизводит работу адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности и позволяет исследовать режимы электротехнической системы с возобновляемыми источниками энергии.

4. Компьютерная модель адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности, интегрированная в цифровой контроллер инвертора и учитывающая изменение входных и выходных параметров, отличающаяся от существующих тем, что позволяет оценивать устойчивую работу силового преобразователя при колебаниях входного напряжения и устанавливать значения коэффициента мощности.

Соответствие паспорту научной специальности. По пункту 1 направлений исследований, в части математического, имитационного и компьютерного моделирования компонентов электротехнических систем; пункту 3 направлений исследований в части разработки алгоритмов эффективного управления; пункту 4 направлений исследований в части исследования работоспособности и качества функционирования электротехнических систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях.

Степень достоверности результатов исследования. Достоверность результатов исследования подтверждается использованием теоретически

обоснованных и апробированных в научной практике методов теории электротехники и силовой электроники, методов определения энергетических характеристик возобновляемых источников энергии, математическое, имитационное и компьютерное моделирование. Разработанные метод формирования стохастических значений входных параметров силового преобразователя и адаптивный алгоритм регулирования реактивной мощности прошли проверку как в рамках имитационного и компьютерного моделирования, так и в условиях практической реализации.

Результаты имитационного моделирования и опытной эксплуатации центрального сетевого солнечного инвертора имеют достаточную сходимость на уровне не ниже, чем 0,9.

Результаты исследования применены при проектировании и создании первого отечественного центрального сетевого солнечного инвертора мощностью 1,5 МВт.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях: XXX Международный научный симпозиум «Неделя горняка – 2022» (Москва, Россия, НИТУ МИСИС, 1–4 февраля 2022 г.); XXXI Международный научный симпозиум «Неделя горняка – 2023» (Москва, Россия, НИТУ МИСИС, 31 января – 3 февраля 2023 г.); XXXII Международный научный симпозиум «Неделя горняка – 2024» (Москва, Россия, НИТУ МИСИС, 30 января – 2 февраля 2024 г.); Научно-практическая конференция «Российский рынок систем электрохимического накопления электрической энергии и батарейных систем электротранспорта. Проблемы и перспективы» (ЦВК «Экспоцентр», Москва, Россия, Павильон 7, 25–27 марта 2024 г.); XXXIII Международный научный симпозиум «Неделя горняка – 2025» (Москва, Россия, НИТУ МИСИС, 3 – 7 февраля 2025 г.); International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE 2025, Beijing, China, 2025).

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 4 научных работы, среди которых 3 – в журналах из перечня ВАК; 2 – в изданиях,

индексируемых в SCOPUS и Web of Science (статья «Солнечная фотоэлектрическая система с отслеживанием максимальной мощности» опубликована в русскоязычной версии в журнале Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE) и в англоязычной версии в журнале International Journal of Hydrogen Energy), получено 2 патента на полезную модель.

1. Gusev G.N., Zhdaneev O.V., Gainullin M.E., Argastsev A.Yu., Lapkin D.N. Solar PV system with maximum power tracking // International Journal of Hydrogen Energy. – 2024. – Vol. 87. – P. 258–267. – DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.08.441. [Англоязычная версия статьи, опубликованной также в журнале Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE)]

2. Гусев Г.Н., Жданеев О.В., Гайнуллин М.Э., Аргасцев А.Ю., Лапкин Д.Н. Солнечная фотоэлектрическая система с отслеживанием максимальной мощности // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). – 2024. – № 6. – С. 12–30. – DOI: <https://doi.org/10.15518/isjaee.2024.06.012-030>. [русскоязычная версия статьи, опубликованной также в журнале International Journal of Hydrogen Energy]

3. Chepiga A., Gainullin M., Gusev G., Lapkin D. Design of Power Control Strategy for Three-Level Neutral Point Clamped Converter Considering Day and Night Operation Modes // 2025 8th International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE), Beijing, China, 27–29 September 2025. – IEEE, 2025. – ISBN 979-8-3503-5716-5. – DOI: 10.1109/REPE66317.2025.11340786.

4. Гусев Г.Н., Гайнуллин М.Э. Анализ потребности рынка РФ в системах накопления энергии с учетом вектора на импортозамещение. Возможность интеграции проектов систем накопления энергии в объекты возобновляемой энергетики // Практическая силовая электроника. – 2024. – № 3(95). – С. 24–31.

5. Гусев Г.Н., Кутепов А.Г., Гайнуллин М.Э. Влияние реактивной мощности on-grid инвертора СЭС на напряжение сети 10 кВ // Практическая силовая электроника. – 2024. – № 4(96). – С. 37–46.

6. Низкочастотный сетевой синхронный выпрямитель: полезная модель № 238088 Рос. Федерация / Рощупкин Г. В., Матвеев М. А., Гусев Г. Н., Гайнуллин М.

Э. — Заявка № 2025122049; приоритет 08.08.2025; зарегистрировано 17.10.2025. — Патентообладатель: ООО «Парус электро».

7. Двухключевой повышающе-понижающий преобразователь с двухполярным выходным напряжением: полезная модель № 239592 Рос. Федерация / Рошупкин Г. В., Гусев Г. Н., Гайнуллин М. Э., Лапкин Д. Н., Гавриленко И. П., Волонин М. С., Брянцева Е. С.— Заявка № 2025131745; приоритет 14.11.2025; зарегистрировано 10.12.2025. — Патентообладатель: ООО «Парус электро».

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа содержит 128 страниц, в том числе 26 рисунков, 8 таблиц, список цитируемых литературных источников, состоящий из 46 наименований, состоит из введения, 4-х глав, заключения и 4-х приложений.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПОДХОДЫ К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ВИЭ В МИРОВОЙ И РОССИЙСКОЙ ПРАКТИКЕ

1.1. История становления и планы развития возобновляемой энергетики

К вопросу об использовании возобновляемых источников энергии обращались ещё на рубеже 17–18 веков, когда промышленность получила сильный толчок к развитию. Применение энергии воды, ветра и солнца пытались найти в мукомольном, ткацком производстве, часто весьма успешно [1].

В 1842 году А.Э. Беккерель открыл эффект преобразования света в электричество. Его коллега, Чарльз Фриттс, нашёл химическое решение проблемы и использовал селен для получения электроэнергии из света [2]. В 1889 году наш соотечественник Александр Столетов опубликовал работу, где изложил принцип фотоэффекта. Однако, первые кремниевые солнечные батареи были выпущены специалистами компании Bell Laboratories спустя более полувека – 25 апреля 1954 года [3].

В истории отмечают два крупнейших перехода от одного ресурса к другому ввиду его истощения: переход от древесины к бурому углю и переход от жира китов к нефти. Повсеместное использование нефти привело к усугублению экологической ситуации на планете и поставило государства в экономическую зависимость от этого невозобновляемого источника энергии [4]. В настоящее время активно осуществляются попытки ухода от невозобновляемых источников энергии к возобновляемым. К последним относятся: энергия солнца, используемая на солнечных электростанциях; энергия ветра, преобразующаяся в электрическую в ветрогенераторах; геотермальная и приливная энергия, с помощью которой электричество, соответственно, получают посредством перепадов температур гейзеров, горячих источников, вулканов с окружающей средой, и перепадов уровней воды в морях и океанах. Стоит отметить, что набирает популярность применение в качестве энергоресурса биотопливо, которое производится в основном из отходов промышленного и сельского хозяйства и может быть использовано и утилизировано безопасно для окружающей среды.

Наиболее широкое применение среди технологий возобновляемой энергетики получают ветроэнергетические и солнечные установки, что обусловлено их технологической зрелостью, экономической доступностью и масштабируемостью. Ветроэнергетические установки характеризуются высоким энергетическим потенциалом при благоприятных климатических условиях и возможностью получения значительной единичной мощности. Солнечные фотоэлектрические системы, в свою очередь, отличаются модульностью, высокой надёжностью, отсутствием подвижных частей и простотой интеграции в распределённые электротехнические системы [6,7].

По сравнению с геотермальными и приливными электростанциями как ветровые, так и солнечные установки обладают существенно более широкой географической областью применения, меньшими капитальными затратами и упрощённой инфраструктурой строительства. Указанные особенности обуславливают их преимущественное использование в автономных и гибридных электротехнических системах, что определяет выбор параметров данных технологий в качестве предмета настоящего исследования.

На сегодняшний день уровень развития возобновляемой энергетики в мире привлекает большие объёмы капитала [36]. Например, по данным организации REN21 в 2014 году мировые инвестиции в ВИЭ и топливо составили 270,2 млрд долл. США, что превысило этот показатель на 17% по сравнению с предыдущим годом, и эта цифра растёт по сей день [8]. В 2018 году 60% всех новых устанавливаемых мощностей в электроэнергетике приходилось на ВИЭ. Лидеры по объёмам устанавливаемых мощностей: США, Германия, Китай – придерживаются тенденции наращивания доли использования возобновляемых источников энергии [37]. Так, к 2030 году в Евросоюзе с помощью нетрадиционной энергетики планируется вырабатывать 70% всей энергии [20].

Несмотря на общий вектор увеличения использования ВИЭ в развитых странах, в России данная область энергетики находится в начальной стадии своего развития. На текущий момент доля возобновляемых источников энергии составляет около 1%, отдавая первенство традиционной энергетике [10].

Вопреки принимаемым правительством мерам по развитию использования возобновляемых источников энергии, вопрос о соответствии мировым тенденциям остаётся открытым. Планы освоения “зелёной” энергетики Россией сильно уступают мировым лидерам: США, Китаю, Австралии и странам Евросоюза. Так, согласно модели развития учёных Стенфордского университета под руководством М. Джейкобсона к 2050 году первые страны планеты смогут полностью перейти на энергию возобновляемых источников [19]. При этом нет нужды в освоении новых территорий, всё возможно интегрировать в уже имеющуюся энергетическую систему. При этом необходимая площадь для осуществления данных целей составляет менее 1% суши.

Вышеизложенный сценарий может получить более благоприятный ход развития, если принять во внимание, что большинство технологий для осуществления модели Джейкобсона уже существуют и реализуются в промышленности [14].

Российской Федерации также предсказано будущее в данном вопросе. Согласно модели Стенфордских учёных, в России преваляировать будет ветроэнергетика с долей в 71,74% от общего потребления. Гидро- и солнечная энергетика при этом составят 4,62% и 2,1% соответственно. Оставшиеся доли распределятся между остальными отраслями энергетики, в том числе к этому времени по-прежнему часть общего потребления будет относиться и к традиционным источникам энергии [17].

Медленное развитие нетрадиционной энергетики в России в первую очередь связано со слабой поддержкой государства несетевых проектов. Энергетические установки, использующие возобновляемые источники энергии, обладают большим сроком окупаемости, что в нашей стране играет решающую роль для предпринимателей и инвесторов [18].

В настоящий момент в Российской Федерации принят ряд документов для увеличения доли ВИЭ в общей энергетической структуре страны, но с инвестиционной стороны данный вопрос не рассмотрен. А именно не предусмотрены налоговые льготы и преференции для производства и

потребителей, использующих возобновляемые источники энергии. В этом кроется проблема всех исследований данного направления, так как они основаны на зарубежной модели фискального стимулирования “зелёной” энергетики [21].

1.2. Эффективность использования ВИЭ в России и в мире

Альтернативные источники энергии начали применяться в энергетике и использоваться людьми при довольно низкой научной базе. Поэтому особенно актуальной до сих пор проблемой остаётся эффективность их использования [13].

Мировой опыт уже не первый год демонстрирует, что получать энергию от возобновляемых источников энергии – это рационально и эффективно. В наиболее развитых в этом плане странах уже построены и введены в эксплуатацию не только здания, но и целые населённые пункты, которые обеспечивают свои энергетические потребности путём работы установок, использующих в качестве энергоресурсов ВИЭ [12].

Страны Евросоюза являются одними из лидеров в развитии и применении возобновляемых источников энергии. Например, в максимально похожих с Россией по климатическим условиям Дании, Финляндии и Швеции доля ВИЭ в общем энергопотреблении составляет 37%, 41% и 55% соответственно [22].

Опыт ближайших соседей, их показатели и экономический рост послужили мотивом для создания политическими лидерами России средств и инструментов, необходимых для расширения сегмента ВИЭ в нашем государстве. Так, например, была принята энергетическая стратегия развития страны до 2035 года [9].

Еще одним фактором, повлиявшим на политическое закрепление стратегии развития ВИЭ в нашей стране, послужило несоответствие структур ВИЭ России и остального мира. Установленная мощность на квалифицированных объектах ВИЭ в России представлена на рисунке 1.1, вектор развития мировой мощности генерации возобновляемой энергетики представлен на рисунке 1.2.

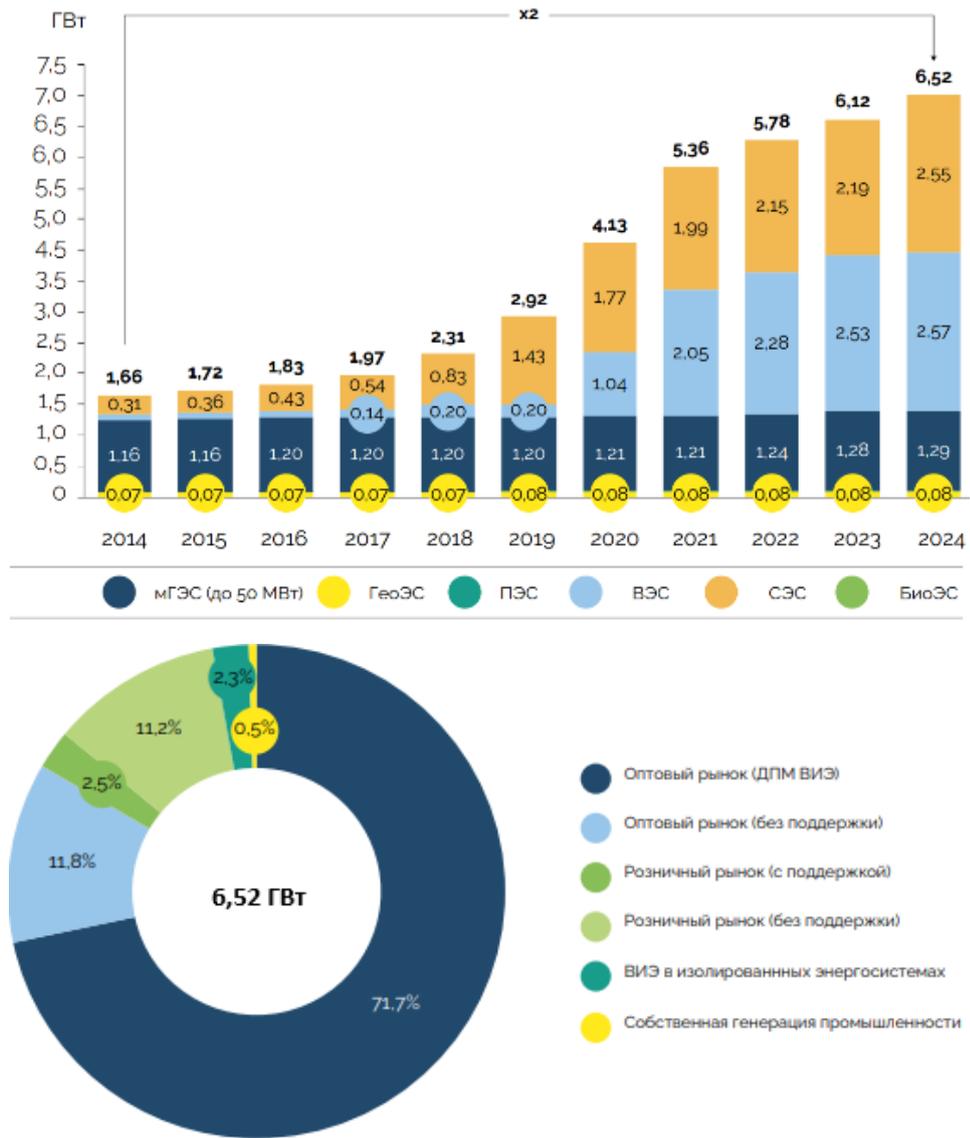


Рисунок 1.1 – Совокупная установленная мощность электростанций на основе ВИЭ в России

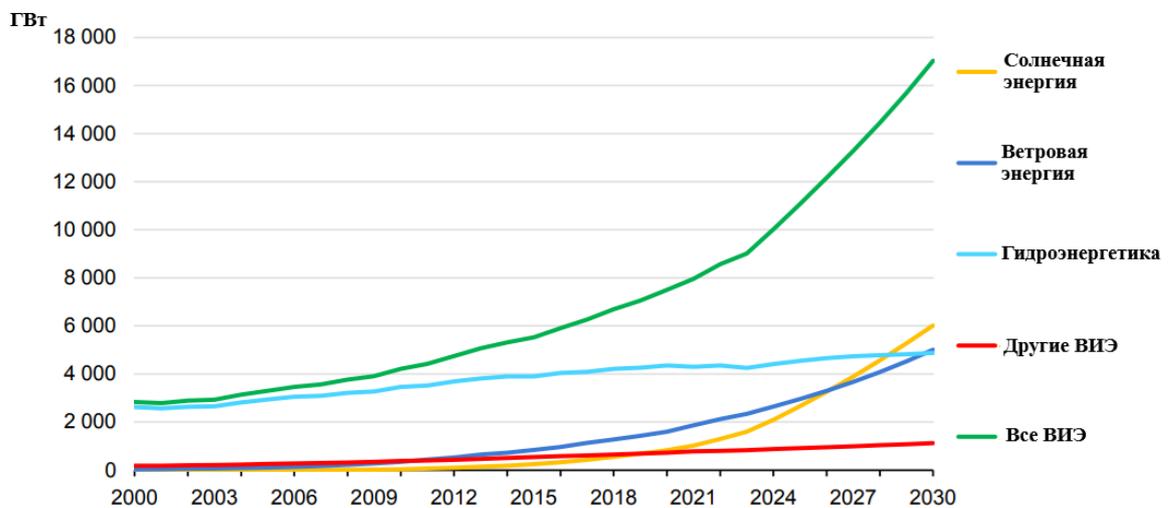


Рисунок 1.2 – Суммарная мощность генерации ВИЭ в мире с прогнозом развития до 2030 года

Произведённый анализ литературы по тематике исследования показал отставание энергетической структуры России в части использования ВИЭ от показателей мировой практики. В то же время, в Российской Федерации за счёт энергетических стратегий развития наблюдается положительный вектор развития данных технологий. На рисунке 1.1 видно, что в России наибольшая доля (71,7%) приходится на оптовый рынок с поддержкой государства – договор поставки мощности (ДПМ ВИЭ), суммарная установленная мощность ВИЭ достигает значения 6,52 ГВт [46].

На фоне данных по российской возобновляемой энергетике рисунок 1.2 демонстрирует глобальный тренд – экспоненциальный рост ВИЭ генерации с преобладающими долями энергии солнца и ветра. Суммарная мощность ВИЭ в мире к 2030 году прогнозируется на уровне свыше 17000 ГВт.

Исходя из вышеизложенного можно отметить, что в России в качестве возобновляемого источника энергии больше всего применяются ресурсы Солнца и ветра. Однако, стоит отметить, что остальные ВИЭ почти не используются. В то же время в остальном мире большее предпочтение отдаётся ветровым энергоресурсам нежели солнечным, и остальным видам возобновляемой энергетики отводится больше внимания, нежели в России.

1.3. Оценка проблематики наиболее распространённых архитектур ВИЭ-генерации

Анализ архитектур ВИЭ-систем показал, что традиционная структура электроэнергетики на базе ВИЭ формировалась с учётом необходимости поддержания баланса между генерацией и электропотреблением [15]. В этих условиях особую актуальность приобретает внедрение систем накопления энергии (СНЭ) в состав объектов ВИЭ как средства повышения гибкости и надёжности электроснабжения.

На рисунке 1.3 представлена самая распространённая архитектура фотоэлектрической станции (ФЭС) с возможностью применения накопителей энергии [5, 33].

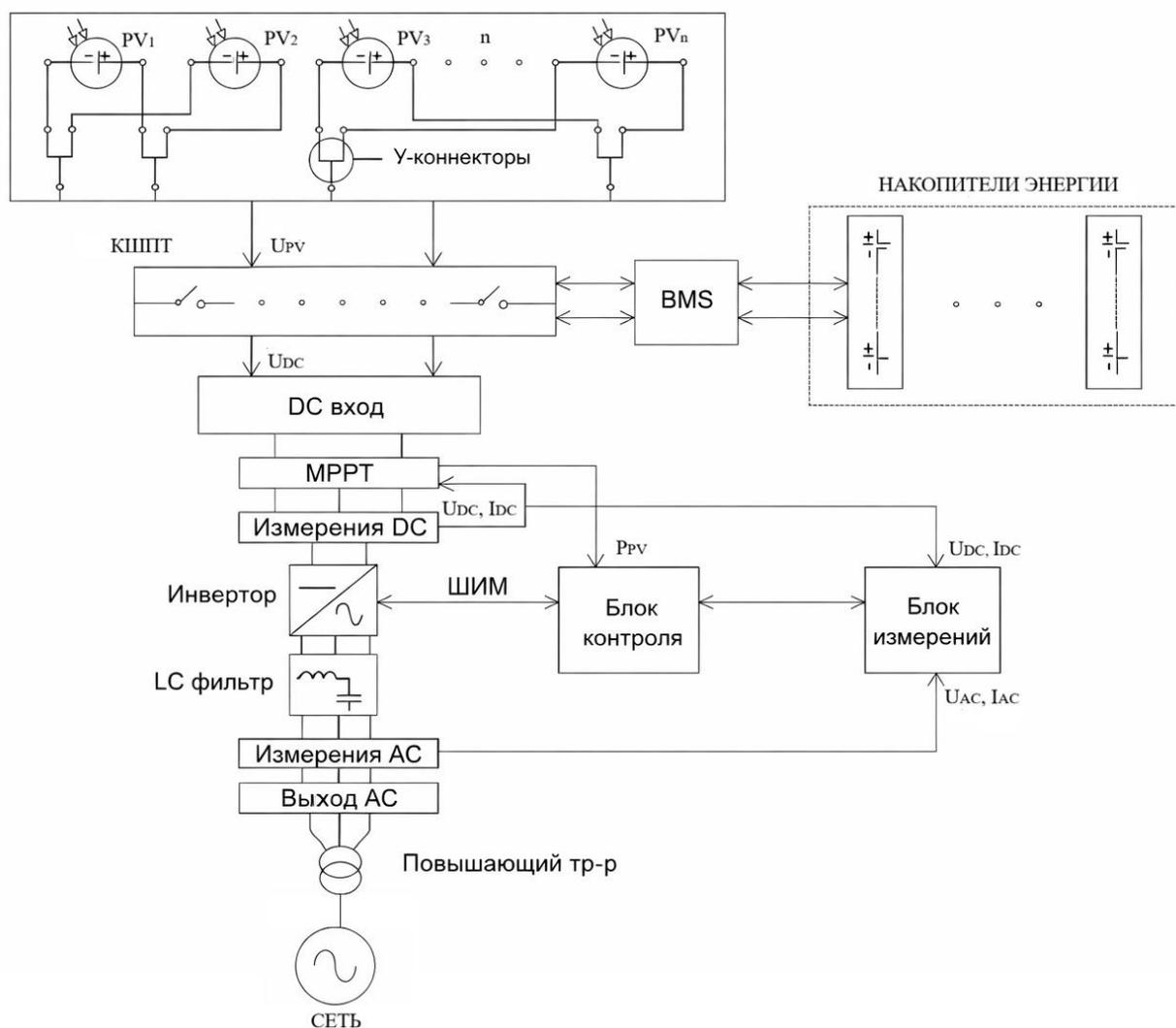


Рисунок 1.3 – Типовая архитектура ФЭС с возможностью применения накопителей энергии

Архитектура ФЭС, дополненная СНЭ и системой управления (рисунок 1.3), включает:

- 1) массив фотоэлектрических модулей ($PV_1 \dots PV_n$), соединённых через Y-коннекторы;
- 2) комплект шинно-предохранительных устройств (КШПТ), обеспечивающих защиту DC-линии;

- 3) систему управления аккумуляторами (BMS), взаимодействующую с накопителями;
- 4) MPPT-контроллер для отслеживания точки максимальной мощности;
- 5) инвертор с LC-фильтром и формированием ШИМ;
- 6) измерительные блоки на стороне постоянного и переменного тока;
- 7) повышающий трансформатор для подключения к сети.

Современные фотоэлектрические станции всё чаще проектируются с учётом необходимости интеграции систем накопления энергии [30]. Это связано с характерной особенностью солнечной генерации – высокой суточной вариативностью выработки и несоответствием профиля генерации графику потребления [16].

Внедрение СНЭ в структуру ФЭС позволяет:

- 1) сглаживать колебания выходной мощности;
- 2) компенсировать провалы генерации в пасмурную погоду;
- 3) выравнять график нагрузки на сеть;
- 4) накапливать избыточную энергию для последующего использования в часы пикового потребления.

Эффект от применения СНЭ наглядно представлен на графике суточной выработки и потребления мощности (рисунок 1.4): оранжевая линия – профиль солнечной генерации, серая – скорректированный профиль с применением накопителей, а синие столбцы – потребление [11]. Рисунок 1.4 показывает преимущества такой модернизации: выработка ФЭС обеспечивает потребности потребителя лишь в диапазоне от 9 часов утра до 17 часов вечера, при этом ФЭС остаётся загружена лишь на 40%. Серым цветом выделен желаемый график вырабатываемой мощности СЭС, которого можно добиться посредством внедрения СНЭ.

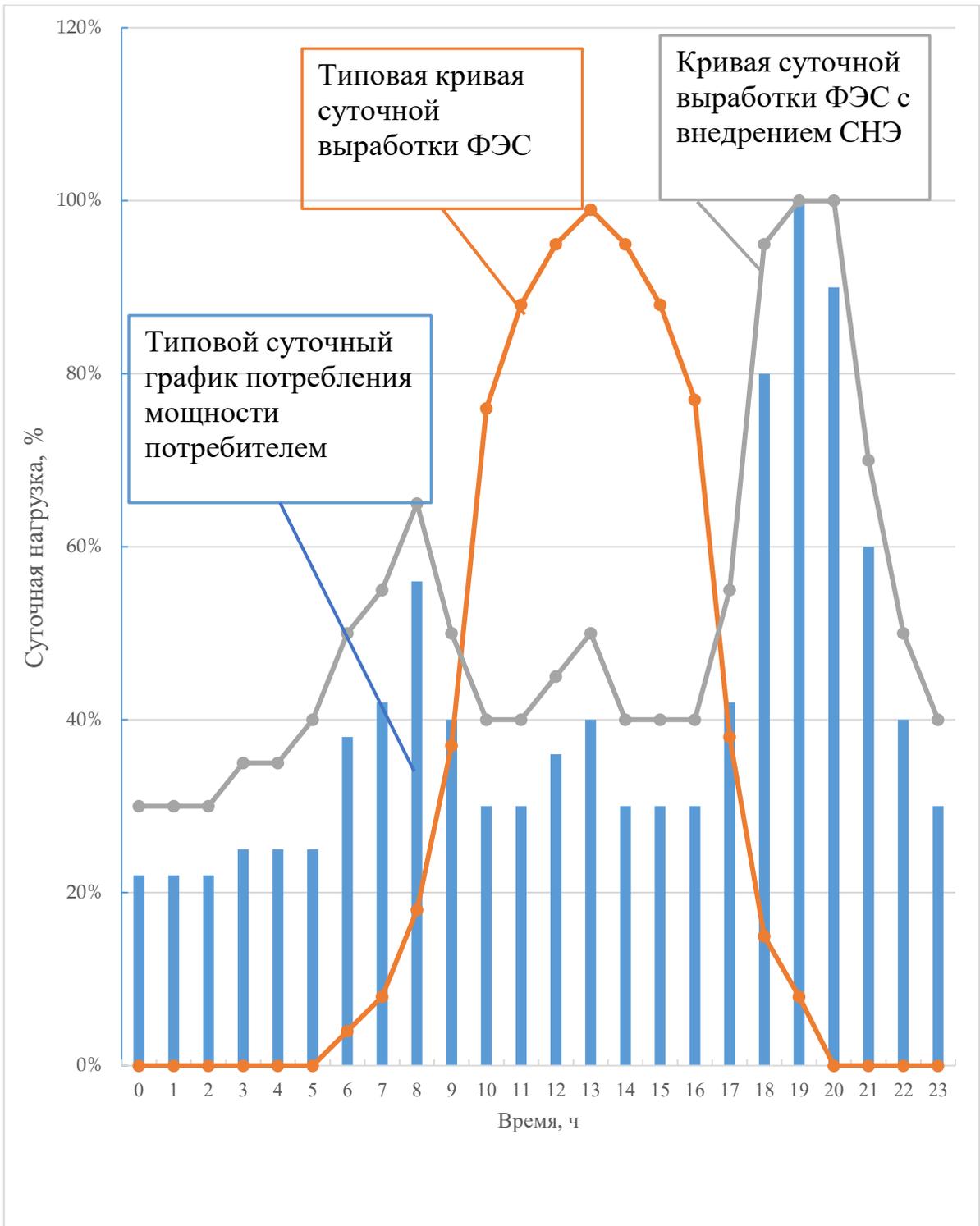


Рисунок 1.4 – Типовые суточные графики выработки мощности ФЭС и потребления мощности

Таким образом, архитектура ФЭС с интегрированными СНЭ является перспективным решением для повышения надёжности и гибкости энергоснабжения, особенно в условиях автономной работы или при ограничениях на качество сетевого напряжения. Это особенно актуально при проектировании

ВИЭ-комплексов для автономных электротехнических систем – удалённых потребителей и промышленных предприятий.

1.4. Обзор современных методов управления технологическими установками на основе ВИЭ

Несмотря на значительный рост интереса к возобновляемым источникам энергии, внедрение соответствующих технологий на ранних этапах характеризовалось недостаточно развитой научно-технической базой [22]. Это проявлялось в низкой энергетической плотности установок, ограниченном коэффициенте полезного действия (как правило, менее 50%), высокой зависимости от климатических факторов, а также в существенных барьерах инвестиционного характера. С развитием цифровых технологий и алгоритмической оптимизации акценты в исследованиях сместились в сторону интеллектуальных методов управления и повышения эффективности преобразования энергии [24].

Анализ современных исследований и экспериментальных данных (рис. 1.5, 1.6) показал, что для повышения эффективности преобразования энергии в установках на основе ВИЭ наибольшую результативность демонстрируют интеллектуальные и эволюционные методы управления.

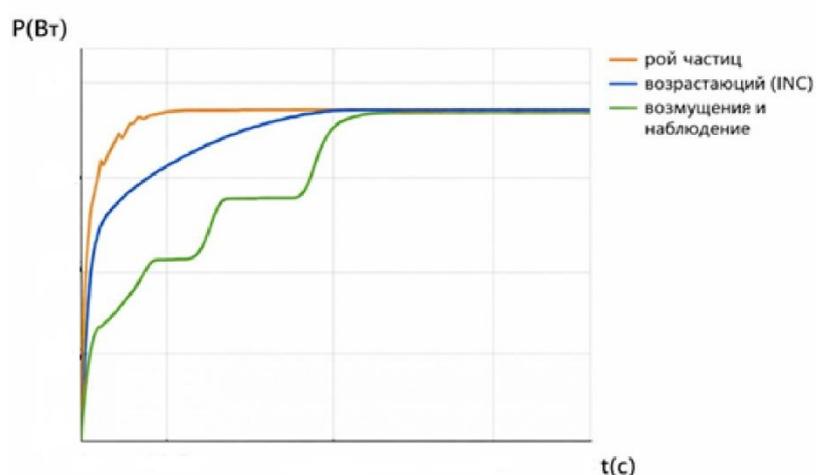


Рисунок 1.5 – Сравнение МРРТ алгоритмов управления инвертором

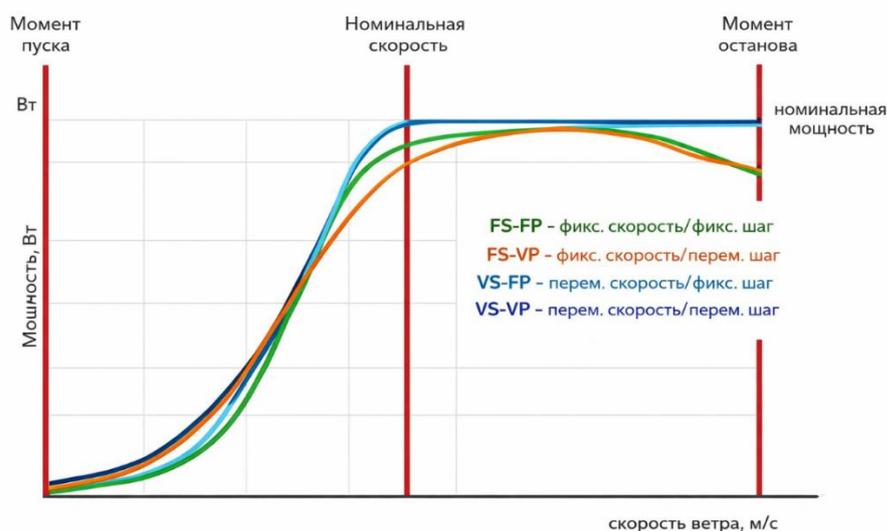


Рисунок 1.6 – Сравнение алгоритмов управления углом атаки лопастей

В частности, в фотоэлектрических системах особое внимание уделяется алгоритмам отслеживания точки максимальной мощности (Maximum Power Point Tracking, MPPT) [38]. Сравнительный анализ, представленный на рисунке 1.5, демонстрирует превосходство эволюционных алгоритмов – в частности, метода роя нечетких частиц (Fuzzy Particle Swarm Optimization, FPSO) – над классическими подходами, такими как метод возмущения и наблюдения (Perturb and Observe, P&O) и инкрементальный метод (Incremental Conductance, INC). Алгоритм FPSO показывает наиболее высокую скорость сходимости к оптимальной точке, сокращая время переходного процесса и тем самым минимизируя потери энергии в фазе стабилизации. По данным моделирования [35], применение FPSO позволяет снизить переходные потери на 20–25% по сравнению с традиционными подходами, что особенно важно в условиях нестабильной солнечной инсоляции.

Ветроэнергетические установки (ВЭУ) также демонстрируют значительное улучшение рабочих характеристик при внедрении адаптивных стратегий управления. Наиболее эффективной среди них является схема VS-VP (Variable Speed – Variable Pitch), предусматривающая одновременное регулирование скорости вращения вала ветроколеса и угла атаки лопастей. Результаты, представленные на рисунке 1.6, подтверждают, что указанная схема обеспечивает

более полное использование потенциала ветрового потока по сравнению с режимами фиксированной скорости и/или фиксированного шага (FS-FP, FS-VP, VS-FP). Внедрение управления по принципу VS-VP позволяет увеличить объём вырабатываемой электроэнергии на 10–15% [43], особенно в диапазонах скорости ветра ниже номинального, где традиционные подходы демонстрируют значительные отклонения от пиковых значений мощности.

Таким образом, анализ научных публикаций и экспериментальных данных показывает, что использование интеллектуальных и эволюционных алгоритмов управления позволяет не только повысить эффективность преобразования энергии в электротехнических системах с возобновляемыми источниками энергии, но и обеспечить гибкость их режимов работы. В условиях стохастического характера генерации особое значение приобретает задача обоснования рациональных режимов функционирования электротехнической системы, обеспечивающих устойчивость параметров напряжения и соблюдения ограничений по полной мощности. В этой связи разработка адаптивных алгоритмов регулирования реактивной мощности рассматривается как инструмент обоснования рациональных режимов электротехнических систем с возобновляемыми источниками энергии.

1.5. Выводы по главе 1

1. Проведён анализ современного состояния и тенденций развития возобновляемых источников энергии в составе автономных и гибридных электротехнических систем, показавший их возрастающую роль в обеспечении устойчивого и энергоэффективного электроснабжения объектов с ограниченной сетевой инфраструктурой.

2. Установлено, что стохастический характер генерации солнечных и ветровых установок приводит к существенным колебаниям мощности, что оказывает влияние на режимы работы силовых преобразователей и устойчивость электротехнических систем с возобновляемыми источниками энергии.

3. Показано, что традиционные подходы к расчёту параметров ВИЭ ориентированы преимущественно на энергетический потенциал и технико-экономическую оценку, при недостаточном учёте влияния переменного характера генерации на режимы функционирования силового преобразователя.

4. Обоснована необходимость формирования стохастических значений входных параметров силового преобразователя с целью исследования режимов регулирования реактивной мощности.

5. Выявлено, что устойчивость режимов электротехнической системы с возобновляемыми источниками энергии в значительной степени определяется алгоритмами управления силовых преобразователей, что требует разработки адаптивных методов регулирования с учётом изменчивости входных параметров.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКИ ФОРМИРОВАНИЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

2.1. Исходные положения

В первой главе показано, что эффективное внедрение электротехнических систем с возобновляемыми источниками энергии требует не только совершенствования их архитектуры и алгоритмов управления, но и детального учёта природно-климатических факторов, а также специфики объекта.

Стохастический характер солнечного и ветрового ресурса оказывает непосредственное влияние на режимы работы электротехнического оборудования, прежде всего силовых преобразователей, определяющих параметры конвертирования энергии и возможности регулирования активной и реактивной мощности. Следовательно, корректное формирование исходных энергетических характеристик ВИЭ является необходимым этапом построения математической модели адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности силового преобразователя электротехнической системы с возобновляемыми источниками энергии.

В этой связи вторая глава посвящена разработке методик формирования стохастических значений входных параметров силового преобразователя электротехнической системы с возобновляемыми источниками энергии. Методики включают вероятностный анализ климатических данных, выбор расчётных моделей, являющихся основой формирования непрерывных временных рядов электрических параметров фотоэлектрических модулей и ветроэнергетических установок.

Новизна методик заключается в разработанном методе, позволяющем выполнить переход от непрерывных вероятностных характеристик возобновляемого источника энергии к непрерывным временным рядам

электрических параметров фотоэлектрических модулей и ветроэнергетических установок.

2.2. Методика формирования стохастических значений входных параметров силового преобразователя электротехнической системы на основе ресурсов Солнца

2.2.1. Расчет энергетического потенциала ресурсов Солнца

В рамках диссертационного исследования расчёт солнечного ресурса рассматривается не как самостоятельная задача выбора установленной мощности фотоэлектрической станции, а как этап формирования значений входных параметров силового преобразователя электротехнической системы с возобновляемыми источниками энергии.

По данным NASA [44] для заданной географической точки A с широтой φ° и долготой ψ° собирается среднемноголетняя информация:

- среднемноголетние месячные значения суммарной $\mathcal{E}_{\Sigma i}^\Gamma$, прямой $\mathcal{E}_{\text{пр}i}^\Gamma$, диффузной $\mathcal{E}_{\text{д}i}^\Gamma$ солнечной радиации (СР) на горизонтальную площадку при средних условиях облачности $\left(\frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{м}^2\cdot\text{мес}}\right)$ для каждого i -го месяца;
- среднемноголетние месячные значения солнечной радиации за пределами земной атмосферы на горизонтальную площадку \mathcal{E}_{0i}^Γ $\left(\frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{м}^2\cdot\text{мес}}\right)$ для каждого i -го месяца;
- среднемесячные коэффициенты отражательной способности поверхности ρ (о.е.).

Полученные среднемноголетние значения солнечной радиации используются не только для оценки потенциала генерации, но и для формирования стохастических входных параметров силового преобразователя электротехнической системы с ВИЭ. В дальнейшем климатические параметры преобразуются в электрические величины, характеризующие мощность и напряжение на стороне постоянного тока.

Количество дней каждого месяца N_i и номера характерных дней (\bar{n}_i) представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Номера характерных дней и количество дней каждого месяца

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
N_i	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
\bar{n}_i	15	45	74	105	135	166	196	227	258	288	319	349

Зависимость максимального прихода солнечной инсоляции в течение года $R_{\text{год}}^{\text{max}}$ ($\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$) от широты местности для условий России представлена в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Зависимость максимального прихода СР в течение года от широты местности для условий России

φ° , град. с. ш.	30	40	50	60	65
$R_{\text{год}}^{\text{max}}$ ($\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$)	850	650	450	250	150

Границы часовых поясов России приведены в таблице 2.3. Часовой пояс Калининградской области не принимается в расчёт ввиду того, что данный регион является анклавом и расчёт энергетических характеристик в Калининградской области необходимо выполнять, принимая во внимание данные других государств, что выходит за рамки методики.

Таблица 2.3 – Границы часовых поясов России (за исключением Калининградской области)

ψ° , град. в. д.	Часовой пояс									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Минимальная долгота ψ_{min}° , град.	7,5	22,5	37,5	52,5	67,5	82,5	97,5	112,5	127,5	142,5
Средняя долгота $\bar{\psi}^\circ$, град.	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150
Максимальная долгота ψ_{max}° , град.	22,49	37,49	52,49	67,49	82,49	97,49	112,49	127,49	142,49	157,49

Расчет энергетического потенциала ВИЭ выполняется при условии, что:

1. Расчет суточного прихода суммарной солнечной радиации на горизонтальную площадку для характерного дня каждого месяца $\mathcal{E}_{\Sigma}^{\text{Г}}(\bar{n}_i)$

производится в предположении равномерного распределения СР по небесной сфере (изотропное распределение).

2. Месячные значения солнечной радиации за пределами земной атмосферы на горизонтальную площадку \mathcal{E}_{0i}^r ($\frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{м}^2\cdot\text{мес}}$) принимаются для ближайшего значения φ° .

3. Максимальный приход солнечной инсоляции для текущего времени t $R_{\text{пр}}^{\text{max}}(t)$ в течение года изменяется по синусоидальному закону. При этом $R_{\text{год}}^{\text{max}}$ соответствует местному полудню 21 июня, т.е. $t \equiv t_{\text{п}}$, где $t_{\text{п}}$ – местное время, соответствующее астрономическому полудню.

4. Прямая составляющая СР $\mathcal{E}_{\text{пр}}^r(\bar{n}_i)$ и продолжительность солнечного сияния за сутки $t_{\text{сс}}(\bar{n}_i)$ для характерных дней i -го месяца изменяются по линейному закону между смежными месяцами (кроме июня).

5. Расчет прихода солнечной инсоляции $R_{\text{пр}}^r(t)$ и прямой составляющей СР $\mathcal{E}_{\text{пр}}^r(t)$ на горизонтальную площадку для текущего времени t производится при условии, что атмосфера абсолютно прозрачная (ясное небо).

После сбора и анализа данных по СР и инсоляции в выбранной географической точке производится выбор модели расчёта солнечной радиации. Для этого необходимо провести расчёт среднемесячного суточного прихода диффузной $\mathcal{E}_{\text{д}}^r(\bar{n}_i)$ составляющей СР на горизонтальную поверхность для 12-ти характерных дней (\bar{n}_i) каждого i -ого месяца, используя две формулы: формула Клейна и формула кафедры Гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии (ГВИЭ) Московского энергетического института.

Суточный приход суммарной солнечной радиации на горизонтальную площадку для характерного дня каждого месяца $\mathcal{E}_{\Sigma}^r(\bar{n}_i)$ определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{\Sigma}^r(\bar{n}_i) = \frac{\mathcal{E}_{\Sigma i}^r}{N_i}, \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{м}^2\cdot\text{сут}}, \quad (2.1)$$

где $\mathcal{E}_{\Sigma i}^r$ – среднегодовое месячные значения суммарной СР на горизонтальную площадку в заданной точке, $\frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{м}^2\cdot\text{мес}}$; N_i – количество дней в i -ом месяце.

Расчет диффузной СР за характерные сутки $\mathcal{E}_{\text{д}}^r(\bar{n}_i)$ i -ого месяца на горизонтальную площадку производится по формуле:

$$\mathcal{E}_d^r(\bar{n}_i) = K_{di} \cdot \mathcal{E}_\Sigma^r(\bar{n}_i), \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут}}, \quad (2.2)$$

где K_{di} – коэффициент пересчета с суммарной на диффузную составляющую солнечной радиации на горизонтальной площадке.

Коэффициент K_{di} для каждого i -ого месяца можно определить по одной из двух моделей:

- формула Клейна [25]:

$$K_{di} = 1,39 - 4,03 \cdot K_{0i} + 5,53 \cdot K_{0i}^2 - 3,11 \cdot K_{0i}^3, \quad (2.3)$$

где K_{0i} – коэффициент прозрачности атмосферы, который определяется по формуле:

$$K_{0i} = \frac{\mathcal{E}_{\Sigma i}^r}{\mathcal{E}_{0i}^r}, \quad (2.4)$$

где \mathcal{E}_{0i}^r – среднемесячный суточный приход СР на горизонтальную площадку за пределами земной атмосферы, $\frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^2 \cdot \text{мес}}$.

- формула кафедры ГВИЭ [25]:

$$K_{di} = 0,2 \cdot K_{di}^* + 0,8 \cdot K_{di}^{**}, \quad (2.5)$$

где

$$K_{di}^* = \varphi^\circ \cdot 0,018 \cdot (0,8756 - 0,1296 \cdot i + 0,0104 \cdot i^2), i = 1, 2, \dots, 12;$$

$$K_{di}^{**} = -0,0538 + 7,4917 \cdot K_{0i} - 20,042 \cdot K_{0i}^2 + 15,256 \cdot K_{0i}^3, i = 1, 2, 3, 12;$$

$$K_{di}^{**} = 1,7439 - 7,172 \cdot K_{0i} + 16,323 \cdot K_{0i}^2 - 14,112 \cdot K_{0i}^3, i = 4, 5, \dots, 11.$$

Оценка точности двух моделей расчета производится сравнением рассчитанных значений с фактическими данными в виде относительной погрешности δ_i для каждого характерного дня. Из двух способов для дальнейших расчетов в точке A принимается лучший по критерию минимальной среднеквадратической ошибки относительной погрешности, определяемой по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12} \delta_i^2}{12}} * 100, \% \quad (2.6)$$

где δ_i – относительная погрешность расчета диффузной составляющей месячного значения СР, рассчитанной по модели относительно фактического значения.

Прямая составляющая СР на горизонтальную площадку для характерного дня каждого месяца $\mathcal{E}_{\text{пр}}^{\text{r}}(\bar{n}_i)$ определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{пр}}^{\text{r}}(\bar{n}_i) = \mathcal{E}_{\Sigma}^{\text{r}}(\bar{n}_i) - \mathcal{E}_{\text{д}}^{\text{r}}(\bar{n}_i), \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^2 \cdot \text{мес}}. \quad (2.7)$$

Для определения годового прихода прямой СР $\mathcal{E}_{\text{пр}}^{\text{год}} \left(\frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^2 \cdot \text{год}} \right)$ и годовой продолжительности солнечного сияния $T_{\text{сс}}^{\text{год}}$ (ч) для 12-ти характерных дней \bar{n}_i каждого i -го месяца в полдень необходимо рассчитать: склонение солнца – $\delta^{\circ}(\bar{n}_i)$, град.; часовой угол солнца в полдень – $\omega^{\circ}(\bar{n}_i)$, град.; угол падения солнца – $\theta^{\circ}(\bar{n}_i)$, град.; максимальное значение прямой СР в полдень – $R_{\text{пр}}^{\text{max}}(\bar{n}_i)$, Вт/м²; продолжительность солнечного сияния за сутки – $t_{\text{сс}}(\bar{n}_i)$, ч; приход прямой СР за сутки – $\mathcal{E}_{\text{пр}}^{\text{r}}(\bar{n}_i), \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут}}$.

Максимальный приход солнечной инсоляции в течение года $R_{\text{год}}^{\text{max}}$ (Вт/м²) определяется в зависимости от широты местности φ° по таблице 2.2 как $R_{\text{год}}^{\text{max}} = f(\varphi^{\circ})$ путем линейной интерполяции между табличными данными.

Склонение солнца – $\delta^{\circ}(\bar{n}_i)$ определяется по формуле:

$$\delta^{\circ}(\bar{n}_i) = \delta^{\circ} \cdot \sin \left[\frac{360^{\circ}}{365} \cdot (284 + \bar{n}_i) \right], \quad (2.8)$$

где 360° – значение полного оборота земли вокруг солнца за год; 365 – число дней в году; 284 – число суток от 21 марта до 31 декабря; $|\delta^{\circ}| = 23,45^{\circ}$.

Часовой угол солнца – $\omega^{\circ}(\bar{n}_i)$ – характеризует угол, на который поворачивается Земля с момента солнечного полдня в рассматриваемой точке ($t_{\text{п}}$) и определяется по формуле:

$$\omega^{\circ}(\bar{n}_i) = 15 \cdot (t - t_{\text{п}}) + (\psi_{\text{А}}^{\circ} - \bar{\psi}^{\circ}), \text{ град.}, \quad (2.9)$$

где 15 – угол, на который за 1 час поворачивается Земля вокруг своей оси, град./ч; t – текущее время, ч; $t_{\text{п}}$ – местное время, соответствующее астрономическому полудню, ч; $\psi_{\text{А}}^{\circ}$ – координата долготы заданной точки, град.; $\bar{\psi}^{\circ}$ – координата

долготы середины часового пояса, в котором расположена заданная точка, град. (определяется из таблицы 2.3).

В соответствии с принятым выше допущением, что $t \equiv t_{\text{п}}$, часовой угол солнца определяется:

$$\omega^\circ(\bar{n}_i) = (\psi_A^\circ - \bar{\psi}^\circ), \text{ град.} \quad (2.10)$$

Угол падения солнца – $\theta^\circ(\bar{n}_i)$, равный углу между прямым потоком СР в заданной точке и перпендикуляром к горизонтальной приемной площадке, определяется по формуле:

$$\theta^\circ(\bar{n}_i) = \arccos[\sin \varphi^\circ \cdot \sin \delta^\circ(\bar{n}_i) + \cos \varphi^\circ \cdot \cos \omega^\circ(\bar{n}_i) \cdot \cos \delta^\circ(\bar{n}_i)]. \quad (2.11)$$

Максимальное значение мощности потока инсоляции в полдень – $R_{\text{пр}}^{\text{max}}(\bar{n}_i)$ определяется по формуле:

$$R_{\text{пр}}^{\text{max}}(\bar{n}_i) = R_{\text{год}}^{\text{max}}(\varphi^\circ) \cdot \cos \theta^\circ(\bar{n}_i), \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}. \quad (2.12)$$

Продолжительность солнечного сияния за сутки – $t_{\text{cc}}(\bar{n}_i)$ определяется по формуле:

$$t_{\text{cc}}(\bar{n}_i) = \frac{2}{15} \cdot \arccos[-\text{tg} \varphi^\circ \cdot \text{tg} \delta^\circ(\bar{n}_i)], \text{ ч.} \quad (2.13)$$

Приход прямой СР за сутки – $\mathcal{E}_{\text{пр}}^{\text{г}}(\bar{n}_i)$ определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{пр}}^{\text{г}}(\bar{n}_i) = \frac{2 \cdot t_{\text{cc}}(\bar{n}_i)}{\pi} \cdot R_{\text{пр}}^{\text{max}}(\bar{n}_i) \cdot 10^{-3}, \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут}}. \quad (2.14)$$

Рассчитанные выше параметры позволяют определить годовую продолжительность солнечного сияния и годовой приход прямой солнечной радиации.

Годовая продолжительность солнечного сияния определяется по формуле:

$$T_{\text{cc}}^{\text{год}} = \sum_{i=1}^{12} t_{\text{cc}}(\bar{n}_i) \cdot N_i, \text{ ч.} \quad (2.15)$$

Годовой приход прямой солнечной радиации определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{пр}}^{\text{год}} = \sum_{i=1}^{12} \mathcal{E}_{\text{пр}}^{\text{г}}(\bar{n}_i) \cdot N_i, \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^2 \cdot \text{год}}. \quad (2.16)$$

Необходимо сравнить рассчитанные для 12-ти характерных дней каждого месяца значения (годовую и месячные) прямой составляющей СР с фактическими данными в виде абсолютной погрешности.

Полученные результаты создают основу для следующего шага – определения суммарного прихода солнечной радиации на поверхность, наклонённую под произвольным углом к горизонту. Это необходимо для анализа влияния ориентации панелей на эффективность улавливания солнечной энергии.

Необходимо выполнить расчет среднемесячного суточного прихода суммарной солнечной радиации на наклонённую к югу приемную площадку под углом β $\mathcal{E}_{сутi}^{\beta}$ для 12-ти характерных дней \bar{n}_i каждого i -ого месяца по формуле:

$$\mathcal{E}_{сутi}^{\beta} = K_{\Sigma}^{\beta} \cdot \mathcal{E}_{пр}^{\Gamma}(\bar{n}_i), \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут}}, \quad (2.17)$$

где K_{Σ}^{β} – коэффициент пересчета среднемесячного суточного прихода солнечной радиации с горизонтальной на наклоненную к югу приемную площадку, определяется по формуле:

$$K_{\Sigma}^{\beta} = (1 - K_{д}^{\Gamma}) \cdot K_{пр} + K_{д}^{\Gamma} \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2}, \quad (2.18)$$

где $K_{пр}$ – коэффициент пересчета среднемесячных приходов прямой солнечной радиации на наклоненную и горизонтальную приемные площадки; $K_{д}^{\Gamma}$ – коэффициент пересчета прихода с суммарной на диффузную солнечную радиацию на горизонтальной площадке; ρ – среднемесячные коэффициенты отражательной способности поверхности.

$K_{пр}$ определяется по формуле:

$$K_{пр} = \frac{\cos(\varphi^{\circ} - \beta) \cdot \cos \delta^{\circ} \cdot \sin \omega_3^{\beta} + \frac{\pi}{180} \cdot \omega_3^{\beta} \cdot \sin(\varphi^{\circ} - \beta) \cdot \sin \delta^{\circ}}{\cos \varphi^{\circ} \cdot \cos \delta^{\circ} \cdot \sin \omega_3^{\Gamma} + \frac{\pi}{180} \cdot \omega_3^{\Gamma} \cdot \sin \varphi^{\circ} \cdot \sin \delta^{\circ}}, \quad (2.19)$$

где φ° – широта точки A , град.; β – угол наклона приемной площадки, град.; δ° – склонение Солнца, град.; ω_3^{β} – часовой угол захода солнца на наклонной площадке, град.; ω_3^{Γ} – часовой угол захода солнца на горизонтальной площадке, град.

Часовой угол захода солнца на горизонтальной площадке определяется по формуле:

$$\omega_3^\Gamma = \arccos[-tg\varphi^\circ \cdot tg\delta^\circ], \text{ град.} \quad (2.20)$$

Часовой угол захода солнца на наклонной площадке определяется по формуле:

$$\omega_3^\beta = \begin{cases} \omega_3^\Gamma & \text{при } \omega_3^\Gamma < \arccos(-tg(\varphi^\circ - \beta) \cdot tg\delta^\circ); \\ \arccos(-tg(\varphi^\circ - \beta) \cdot tg\delta^\circ) & \end{cases}, \text{ град.} \quad (2.21)$$

Коэффициент пересчета прихода с суммарной на диффузную солнечную радиацию на горизонтальной площадке K_d^Γ определяется в зависимости от выбранной модели расчета коэффициента пересчета диффузной составляющей (модель Клейна или модель ГВИЭ) по формулам (2.3) или (2.5), соответственно.

После расчёта поступающей радиации на поверхности различной ориентации выполняется оптимизация угла наклона приёмной площадки. При этом определяется значение угла, при котором обеспечивается наибольший суммарный приход солнечной энергии в течение года.

Поиск оптимального угла наклона площадки β производится для года в целом и для каждого месяца отдельно. Для этого, по описанному ранее алгоритму, изменяя β от 0° до 90° с шагом 10° , находятся оптимальные углы, при которых полученная энергия будет максимальна за год и для каждого месяца.

Полученные характеристики солнечной радиации используются для формирования непрерывного временного ряда генерируемой мощности, используемой как входное воздействие на силовой преобразователь электротехнической системы.

В отличие от традиционного инженерного подхода, ориентированного на определение установленной мощности компоновки фотоэлектрических модулей, в диссертационной работе основное внимание уделяется формированию непрерывных временных рядов мощности, определяющих режимы работы преобразовательной части электротехнической системы с возобновляемыми источниками энергии.

2.2.2. Метод формирования стохастических значений входных параметров силового преобразователя на основе ресурсов Солнца

Полученные в 2.2.1 среднемноголетние значения солнечной радиации позволяют определить интегральные характеристики ресурса для рассматриваемой географической точки. Однако для исследования режимов электротехнической системы средних значений недостаточно. Реальные режимы эксплуатации определяются внутрисуточной и межсуточной вариативностью солнечного потока, обусловленной облачностью, прозрачностью атмосферы и сезонными изменениями.

В связи с этим возникает необходимость разработки метода формирования стохастических значений входных параметров силового преобразователя, отражающих стохастический характер возобновляемого источника энергии.

Метод направлен на формирование непрерывного временного ряда активной мощности солнечной генерации, отражающего вероятностный характер изменения климатических условий и используемого для дальнейшего моделирования режимов электротехнической системы.

Для нормировки текущих значений солнечной радиации используется индекс ясности атмосферы по времени, рассчитываемый по формуле:

$$K_t = \frac{\mathcal{E}_t}{\mathcal{E}_{0,t}}, \quad (2.22)$$

где \mathcal{E}_t – суммарная солнечная радиация на поверхность земли за выбранный период, $\frac{\text{Вт}\cdot\text{ч}}{\text{м}^2\cdot\text{т}}$; $\mathcal{E}_{0,t}$ – солнечная радиация за пределами атмосферы за выбранный период, $\frac{\text{Вт}\cdot\text{ч}}{\text{м}^2\cdot\text{т}}$.

Приведенный выше индекс характеризует долю солнечного потока, достигающего поверхности Земли, и позволяет перейти от абсолютных энергетических величин к безразмерной характеристике прозрачности атмосферы.

Поскольку индекс K_t принимает значения в диапазоне $0 < K_t < 1$, его вариации целесообразно описывать с использованием бета-распределения. В

рамках настоящего исследования принимается, что в пределах каждого месяца индекс ясности является случайной величиной:

$$K_t \sim \text{Beta}(\alpha_m, \beta_m), \quad (2.23)$$

где α_m и β_m – параметры распределения, определяемые через среднемесячное значение μ_m и коэффициент вариации $c_{v,m}$, рассчитываемые по формулам (2.24) и (2.25):

$$\mu_m = \frac{\sum_{\Sigma}^M}{\sum_0^M}, \quad (2.24)$$

где \sum_{Σ}^M – среднемесячное значение суммарной солнечной радиации, \sum_0^M – солнечная радиация за пределами атмосферы за месяц, получаемые из базы данных NASA аналогично с параграфом 2.2.1 диссертационного исследования.

$$c_{v,m} = \frac{\sigma_m}{\mu_m}, \quad (2.25)$$

где σ_m – среднеквадратичное отклонение индекса ясности за рассматриваемый период, рассчитываемое по формуле:

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (K_{t,i} - \mu_m)^2}. \quad (2.26)$$

Параметры бета-распределения вычисляются по выражениям:

$$\alpha_m = \mu_m \cdot \left(\frac{\mu_m(1 - \mu_m)}{\sigma_m^2} - 1 \right); \quad (2.27)$$

$$\beta_m = (1 - \mu_m) \cdot \left(\frac{\mu_m(1 - \mu_m)}{\sigma_m^2} - 1 \right). \quad (2.28)$$

Таким образом обеспечивается переход от непрерывных вероятностных характеристик ресурса Солнца к временным рядам электрических параметров фотоэлектрического модуля. Такой подход позволяет сформировать набор вероятностных сценариев изменения солнечной радиации в пределах расчётного периода при использовании среднемесячных характеристик, получаемых по данным NASA.

Формирование непрерывного временного ряда активной мощности фотоэлектрических модулей осуществляется в два этапа.

Сначала определяется суточная солнечная радиация по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{сут}} = K_t \cdot \mathcal{E}_{0,\text{сут}}, \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^2}, \quad (2.29)$$

где $\mathcal{E}_{0,\text{сут}}$ – максимально возможная солнечная радиация за сутки при абсолютно чистом небе, $\frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^2}$.

Для перехода к мгновенной инсоляции используется нормированная функция суточного распределения солнечного потока или суточного распределения инсоляции:

$$R(t) = \mathcal{E}_{\text{сут}} \cdot f_{\text{сут}}(t), \quad (2.30)$$

где $f_{\text{сут}}(t)$ удовлетворяет условию:

$$\int_0^{24} f_{\text{сут}}(t) dt = 1. \quad (2.31)$$

Далее выполняется пересчёт инсоляции на плоскость массива фотоэлектрических модулей по выражению:

$$R_{\text{ФЭМ}}(t) = R(t) \cdot k(\beta, \gamma, t), \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}, \quad (2.32)$$

где $k(\beta, \gamma, t)$ – коэффициент пересчёта с горизонтальной поверхности в плоскость массива фотоэлектрических модулей с учётом угла наклона – β , азимута – γ , времени – t .

Полученное значение используется для формирования непрерывного временного ряда активной мощности фотоэлектрического массива:

$$P_{\text{ФЭМ}}(t) = \eta(T_c) \cdot A \cdot R_{\text{ФЭМ}}(t), \text{Вт}, \quad (2.33)$$

где A – суммарная площадь фотоэлектрических модулей, м^2 ; T_c – коэффициент преобразования с учётом температурной поправки.

Таким образом разработанный метод формирования стохастических значений входных параметров силового преобразователя электротехнической системы с возобновляемыми источниками энергии позволяет обеспечить переход от непрерывных вероятностных характеристик ресурсов Солнца к непрерывным

временным рядам активной мощности $P_{ФЭМ}(t)$, отражающим вероятностный характер изменения климатических условий.

В электротехнических системах с ВИЭ установки, использующие солнечные ресурсы, часто дополняются установками, использующими энергию ветра, для повышения эффективности. Для формирования стохастических значений входных параметров силового преобразователя электротехнических систем с ветроустановками необходимо определить вероятностные характеристики ветрового ресурса и преобразовать их в электрические параметры генерации.

2.3. Методика формирования стохастических значений входных параметров силового преобразователя электротехнической системы на основе ресурсов ветра

2.3.1. Расчет энергетического потенциала ресурсов ветра

Для заданной географической точки A с широтой φ° и долготой ψ° собираются архивные многолетние данные с ближайшей к точке наземной метеостанции (МС) с сайта «Расписание Погоды» [45].

На сайте «Расписание погоды» представлена климатическая информация о погоде в 152 странах, из них 46 стран вынесены на отдельные сайты. В целом данный источник представляет прогноз погоды на ближайшие шесть суток и информацию о фактической погоде. Прогнозы составляются на данных модели UKMET MetOffice (Великобритания) и предоставляются на сайте по соответствующей лицензии. На сайте «Расписание погоды» для РФ представляется информация по 125285 населенным пунктам. Для выбранного населенного пункта из архива данных можно получить информацию за интересующий период времени по всем дням либо только по указанному месяцу или дате.

Из 25 климатических данных, представленных на сайте, в качестве исходных для ветроэнергетических расчетов следует выбирать следующие: местная температура $T [^\circ C]$; давление, приведённое к уровню моря $P_0 [Па]$, фактическое атмосферное давление $P [Па]$, азимут направления ветра $dd [град.]$ (направление

ветра указано в шестнадцати румбах), средняя скорость ветра за 10-и минутный период на высоте 10–12 метров \overline{V} [м/с]; максимальный порыв за 10 минут наблюдаемого срока V_{T10} [м/с]; максимальный порыв ветра между сроками V_{T3} [м/с].

К основным статистическим характеристикам ветра за период времени T относятся: средние скорости ветра V ; среднеквадратичные отклонения скоростей ветра σ_v ; коэффициенты вариации скоростей ветра C_v ; максимальные скорости ветра V_T^{max} ; повторяемости скоростей ветра $t(V)$ и направлений ветра $t(\vec{V})$ [29].

Расчет основных многолетних характеристик ветра проводится по ряду наблюдений и повторяемости скорости ветра. Устойчивость статистических многолетних характеристик ветра зависит от длительности ряда многолетних наблюдений. Длительность ряда с сайта "Расписание погоды" составляет 8 лет, при рекомендациях длительности ряда 5–10 лет и более [45].

Для определения энергетического потенциала ветра в исследуемой точке необходимо провести статистическую обработку многолетнего ряда наблюдений. На этом этапе рассчитываются средние и экстремальные значения скоростей ветра, коэффициенты вариации и другие основные характеристики ветрового потока [28].

Расчет среднемноголетней скорости ветра \bar{V}_0 по многолетнему ряду наблюдений V_i производится по формуле:

$$\bar{V}_0 = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n}, \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (2.34)$$

где n – общее количество всех наблюдений скорости V_i за время T .

Значение средней скорости ветра \bar{V}_0 за любой интервал времени также определяется по формуле (2.34).

Коэффициент вариации C_v (о.е.) определяется по формуле:

$$C_v = \frac{\sigma_v}{\bar{V}_0}, \quad (2.35)$$

где σ_v – среднеквадратическое отклонение, определяемое по формуле:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V}_0)^2}{n - 1}}, \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (2.36)$$

Максимальная скорость ветра V_T^{max} определяется как скорость, возможная один раз в заданное число лет и оценивается за период времени T .

Среднемноголетняя удельная мощность ветрового потока $\bar{N}_{уд}$ определяется по формуле:

$$\bar{N}_{уд} = \frac{\sum_{i=1}^n N_{удi}}{n} = \frac{0,5 \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^n V_i^3}{n}, \text{ кВт}, \quad (2.37)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³; V_i – скорость воздушного потока на высоте флюгера, м/с; n – количество наблюдений в многолетнем ряду [27].

Среднемноголетняя (годовая) удельная энергия ветрового потока $\bar{\mathcal{E}}_{уд}$ – энергия, протекающая за год (за 8760 часов) через 1 м² поперечного сечения, определяется по формуле:

$$\bar{\mathcal{E}}_{уд} = \bar{N}_{уд} \cdot 8760, \text{ кВт}\cdot\text{ч}. \quad (2.38)$$

Повторяемость скоростей ветра $t(V)$ (в относительных единицах или процентах) показывает, какую часть времени в течение рассматриваемого периода времени T (от нескольких минут до многих лет) дули ветра с той или иной скоростью (основные характеристики ветра).

Расчет дифференциальной повторяемости скорости ветра $t(V)$ производится по формулам статистической обработки данных:

$$t(\bar{V}_j^{гр}) = \frac{m_j}{n + 1}; \quad (2.39)$$

$$\bar{V}_j^{гр} = 0,5 \cdot (V_j^{гр} + V_{j+1}^{гр}), \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (2.40)$$

где $t(\bar{V}_j^{гр})$ – повторяемость скорости в j -ой градации, о.е.; $\bar{V}_j^{гр}$ – средняя скорость ветра в j -ой градации, м/с; m_j – число замеров скорости V_i ($i = 1, \dots, n$), попадающих в j -ую градацию, о.е.; n – общее число замеров скорости за рассматриваемый период времени T (месяц, год, несколько лет), о.е.

Аналогично $t(V)$ рассчитывается повторяемость направлений ветра $t(\vec{V})$ по восьми основным румбам: С, СВ, В, ЮВ, Ю, ЮЗ, З, СЗ.

Определяется кривая продолжительности (обеспеченности) скоростей ветра $P(V)$ для каждого j -ого интервала скорости (градации) по формуле:

$$P(V_1 = 0 \text{ м/с}) = 100\%;$$

$$P(V_i) = P(V_j) = 100\% - \sum_{k=1}^{j-1} t(\bar{V}_j^{\text{гp}}), \quad (2.41)$$

где $j = 2, \dots, N_{\text{гp}}$, где $N_{\text{гp}}$ – количество интервалов (градаций); V_j – левая граница (минимальная скорость) j -го интервала, м/с; $P(V_i) = P(V_j)$ – вероятность того, что скорость ветра V_i , попадающая в j -ый интервал ($V_j \leq V_i \leq V_{j+1}$) превысит минимальную скорость ветра V_j из этого интервала.

Далее расчёты выполняются по данным многолетней повторяемости скорости ветра. Это позволяет уточнить энергетические параметры потока и определить удельную мощность и энергию ветра за год.

Рассчитываются следующие основные энергетические характеристики ветра на площадке метеостанции: среднемноголетняя скорость \bar{V}_0 ; коэффициент вариации скорости ветра C_v ; удельная мощность ветра $\bar{N}_{\text{уд}}$ и удельная энергия ветра $\bar{E}_{\text{уд}}$.

Расчет среднемноголетней скорости ветра по повторяемости скорости по средним интервалам градаций $t(\Delta V_j^{\text{гp}})$:

$$\bar{V}_0 = \sum_{j=1}^{N_{\text{гp}}} V_j^{\text{гp}} \cdot t(\Delta V_j^{\text{гp}}), \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (2.42)$$

где $\Delta V_j^{\text{гp}}$ – интервал j -ой градации, м/с.

Среднеквадратичное отклонение скоростей ветра σ_v (м/с) по повторяемости скорости ветра определяется по формуле:

$$\sigma_v = \sqrt{\sum_{j=1}^{N_{\text{гp}}} (V_j^{\text{гp}} - \bar{V}_0)^2 \cdot t(\Delta V_j^{\text{гp}})}, \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (2.43)$$

Коэффициент вариации C_v (о.е.) рассчитывается по формуле (2.35).

Среднемноголетняя (годовая) удельная энергия ветрового потока $\bar{E}_{\text{уд}}$ (кВт·ч) по повторяемости скорости ветра $t(V)$ определяется по формуле:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{уд}} &= \sum_{j=1}^{N_{\text{гр}}} \mathcal{E}_{\text{уд}j}(\bar{V}_j^{\text{гп}}) = \sum_{j=1}^{N_{\text{гр}}} N_{\text{уд}j} \cdot t(\Delta V_j^{\text{гп}}) \cdot T = \\ &= \sum_{j=1}^{N_{\text{гр}}} \left[\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (\bar{V}_j^{\text{гп}})^3 \cdot t(\Delta V_j^{\text{гп}}) \cdot T \right], \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{год}}, \end{aligned} \quad (2.44)$$

где $T = 8760$ – число часов в году.

Среднемноголетняя удельная мощность ветрового потока $\bar{N}_{\text{уд}}$ может быть определена по формуле:

$$\bar{N}_{\text{уд}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{уд}}}{T}, \text{ кВт}. \quad (2.45)$$

После определения усреднённых характеристик проводится анализ многолетней изменчивости скоростей ветра. Этот шаг позволяет выделить характерный год, наиболее полно отражающий условия площадки для дальнейшего моделирования.

Многолетние вариации скорости ветра представляют собой изменение среднегодовых значений скорости ветра, определение которых производится по формуле (2.34). Выбор характерного года производится среди лет с полнотой ряда не менее 95% [27] по критерию минимального относительного отклонения среднегодовой скорости ветра от среднемноголетней. Оценка полноты ряда проводится по формуле:

$$\text{Полнота ряда} = \frac{(K_{\text{полн}} - K_{\text{проп}})}{K_{\text{полн}}} \cdot 100\%, \quad (2.46)$$

где $K_{\text{полн}}$ – полное количество данных в ряду наблюдений с учетом интервала времени Δt ; $K_{\text{проп}}$ – количество пропущенных и отбракованных данных, например скорость ветра 200 м/с.

В качестве дополнительного критерия для уточнения выбора расчетного года необходимо рассмотреть критерий – минимальное среднеквадратичное отклонение годовой повторяемости скорости ветра от среднемноголетней повторяемости. Окончательно выбирается расчетный год по совокупности всех критериев.

Среднеквадратичное отклонение σ_t годовой повторяемости $t^N(V)$ для N -ого года от среднемноголетней $t^{\text{MH}}(V)$ определяется по формуле:

$$\sigma_t = \sqrt{\{M[t^T(V) - t(V)]\}^2, \frac{M}{c}}, \quad (2.47)$$

где $M[t^{\text{MH}}(V) - t^N(V)]$ – математическое ожидание, рассчитываемое для дискретных значений $t^{\text{MH}}(\Delta V_j^{\text{rp}})$ и $t^N(\Delta V_j^{\text{rp}})$ по выражению:

$$M[t^{\text{MH}}(V) - t^N(V)] = \sqrt{\sum_{j=1}^{N_{\text{rp}}} M_j} = \sqrt{\sum_{j=1}^{N_{\text{rp}}} [t^{\text{MH}}(\Delta V_j^{\text{rp}}) - t^N(\Delta V_j^{\text{rp}})]^2 \cdot \Delta V_j^*}, \quad (2.48)$$

где ΔV_j^* в о.е. рассчитывается по формуле:

$$\Delta V_j^* = \frac{\Delta V_j^{\text{rp}}}{V^{\text{max}}}, \quad (2.49)$$

где ΔV_j^{rp} – интервал скорости j -ой градации, м/с; V^{max} – максимальная скорость ветра за наблюдаемый период, м/с.

Следующим этапом необходимо определить статистическое распределение скоростей ветра. Для этой цели используется двухпараметрическое распределение Вейбулла, позволяющее корректно описывать вероятностную структуру ветрового потока.

Математическое выражение двухпараметрического распределения Вейбулла имеет вид:

$$t^B(V) = \Delta V_j \cdot \frac{\gamma}{\beta} \cdot \left(\frac{V}{\beta}\right)^{\gamma-1} \cdot e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^\gamma}, \quad (2.50)$$

где ΔV_j – интервал j -ой градации; γ и β – параметры функции распределения Вейбулла.

Параметр γ (в о.е.) определяет форму рассматриваемой кривой распределения, а параметр β (в м/с) – масштабный параметр скорости. При $\gamma = 1$ функция распределения Вейбулла носит название экспоненциального распределения, при $\gamma = 2$ распределение имеет специальное название – однопараметрическое распределение Рэлея.

Параметр γ определяется по эмпирической формуле Л.Б. Гарцмана, справедливой для $1,0 \leq \gamma \leq 10,0$:

$$\gamma = C_V^{-1,069}, \quad (2.51)$$

где C_V – коэффициент вариации скорости ветра, определяемый по многолетней $t(V)$, о.е.

Второй параметр двухпараметрического распределения функции Вейбулла – β (в м/с) определяется по формуле:

$$\beta = \frac{\bar{V}_0}{\Gamma(1 + \frac{1}{\gamma})}, \quad (2.52)$$

где \bar{V}_0 – среднемноголетняя скорость; Γ – гамма-функция.

Оценка применимости теоретического распределения повторяемости скорости ветра $t^T(V)$ на данной площадке производится по двум критериям:

- по значению среднеквадратичного отклонения σ_t данных фактической среднемноголетней кривой повторяемости $t(V)$ от теоретической $t^T(V)$, максимально допустимое значение которой для условий России принято на уровне 6 %;

- по относительным отклонениям для каждой градации теоретической повторяемости скорости ветра по распределению Вейбулла от фактической повторяемости – $\Delta_j^{\phi-B}$, которое не должно превышать 20% при условии, что фактическая повторяемость более 1% для рассматриваемой градации.

Основным критерием применимости считается первый критерий, учет второго критерия особенно важен для рабочей зоны скорости ветра ВЭУ, которая для современных ВЭУ меняется от 3 м/с до 25 м/с.

σ_t определяется по формуле:

$$\sigma_t = \sqrt{\{M[t^T(V) - t(V)]\}^2, \frac{M}{c}}, \quad (2.53)$$

где $t^T(V)$ – теоретическая повторяемость (распределение Вейбулла) в о.е.; $t(V)$ – фактическая повторяемость в о.е.; $M[t^T(V) - t(V)]$ – математическое ожидание, рассчитываемое для дискретных значений $t^T(\Delta V_j^{\text{гп}})$ и $t(\Delta V_j^{\text{гп}})$ по выражению:

$$M[t^T(V) - t(V)] = \sqrt{\sum_{j=1}^{N_{\text{гп}}} M_j} = \sqrt{\sum_{j=1}^{N_{\text{гп}}} [t^T(\Delta V_j^{\text{гп}}) - t(\Delta V_j^{\text{гп}})]^2 \cdot \Delta V_j^*}, \quad (2.54)$$

где ΔV_j^* в о.е. рассчитывается по формуле:

$$\Delta V_j^* = \frac{\Delta V_j^{\text{гп}}}{V^{\text{max}}}, \quad (2.55)$$

где $\Delta V_j^{\text{гп}}$ – интервал скорости j -ой градации, м/с; V^{max} – максимальная скорость ветра за наблюдаемый период, м/с.

Полученные статистические характеристики служат основой для построения вертикального профиля скорости ветра. Этот расчёт необходим для определения изменения скорости и мощности потока с высотой, что имеет ключевое значение при выборе высоты установки ветроагрегатов.

Расчет средней скорости ветра по высоте производится по степенной зависимости вертикального профиля ветра по формуле:

$$\bar{V}_0^h = \bar{V}_0 \cdot \left(\frac{h}{10}\right)^{m_0}, \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (2.56)$$

где \bar{V}_0 – скорость ветра на площадке ВЭС на высоте 10 м, м/с; \bar{V}_0^h – скорость ветра на площадке МС на высоте h , м/с; h – высота от поверхности земли, принимаемая от 10 м до 110 м с шагом 10 м, м; m_0 – показатель степени (Хеллмана), который определяется по формуле:

$$m_0(\bar{V}_0) = 0,68 \cdot \bar{V}_0^{-0,91}. \quad (2.57)$$

Для каждой высоты осуществляется пересчет повторяемости скорости ветра по распределению Вейбулла для стандартных значений градаций. При этом принимается допущение, что параметр γ по высоте не меняется, а расчет параметра β производится по формуле (2.52) с учетом изменения среднегодовой скорости.

Скорости ветра, соответствующие максимальным значениям распределения удельной энергии ветра $\mathcal{E}_{\text{уд}}(V)$ – энергетические скорости ветра V_E , обеспечивающие наибольший вклад в годовую выработку энергии.

Для определения значений V_E на разной высоте требуется рассчитать $\mathcal{E}_{уд}(V)$ по теоретическим повторяемостям скорости ветра по формуле (2.44) и определить скорости, соответствующие максимальному значению $\mathcal{E}_{уд}(V)$.

Определение данных значений производится с использованием параметров γ и β распределения Вейбулла по формулам:

- при $\gamma < 1,77$

$$V_T^{max} = \beta \left[-\ln \left\{ 1 - \exp \left(\frac{\ln(1 - 1/T)}{n} \right) \right\} \right]^{\frac{1}{\gamma}}, \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (2.58)$$

где n – полное количество данных за расчётный период T .

- при $\gamma > 1,77$ формула (2.58) имеет тенденцию недооценивать максимальную скорость и ее следует определять по формуле:

$$V_T^{max} = (4 \div 6) \cdot \bar{V}_o, \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (2.59)$$

где $(4 \div 6)$ – эмпирический коэффициент, используемый в отечественных методиках ветроэнергетических расчётов для оценки максимально возможной скорости ветра при высоких значениях параметра γ .

Расчет всех характеристик следует производить на разных высотах в зависимости от высоты устанавливаемой башни ВЭУ H_6 (м).

После получения распределения скоростей ветра по высоте производится оценка валового ветрового потенциала. Рассчитывается количество энергии, которое может быть получено с единичной площади на разных высотах размещения турбин.

Расчет валового ветрового потенциала $\mathcal{E}_{вал}^{H_6}$ с площади размещения ВЭУ на разной высоте за период времени один год (для среднемноголетнего года) производится по формуле:

$$\mathcal{E}_{вал}^{H_6} = \frac{\bar{N}_{уд} \cdot F \cdot 8760}{L \cdot H_6}, \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{год}}, \quad (2.60)$$

где F – площадь размещения ВЭУ, м^2 ; H_6 – высота башни ВЭУ, м; L – расстояние между ВЭУ, м.

Таким образом, на основании приведенных выражений расчёта можно сделать вывод о их применимости для достоверной оценки ветрового потенциала и принятия обоснованных инженерных решений.

Полученные характеристики ресурсов ветра используются для формирования непрерывного временного ряда генерируемой мощности ветроустановок, используемой как входное воздействие на силовой преобразователь электротехнической системы.

2.3.2. Метод формирования стохастических значений входных параметров силового преобразователя на основе ресурсов ветра

Ветровая генерация, как и солнечная, характеризуется выраженной случайной изменчивостью, обусловленной метеорологическими и климатическими факторами. Для корректного моделирования режимов работы электротехнической системы необходимо формирование непрерывного временного ряда мощности ветровой установки, отражающего вероятностный характер изменения скорости ветра и её влияния на электрические параметры генерации.

В отличие от детерминированных расчётов установленной мощности, в диссертационном исследовании ветровой ресурс рассматривается как стохастический процесс, описываемый статистическим распределением скоростей ветра и преобразуемый в электрическую мощность с учётом аэродинамических характеристик турбины.

Метод направлен на формирование непрерывного временного ряда активной мощности ветроустановки, отражающего вероятностный характер изменения климатических условий и используемого для дальнейшего моделирования режимов электротехнической системы.

Статистические характеристики ветрового ресурса, используемые при формировании непрерывного временного ряда мощности ветроэнергетической установки, определены в параграфе 2.3.1 в рамках оценки ветрового потенциала площадки.

В соответствии с формулой (2.42) среднемноголетняя скорость ветра определяется по повторяемости скоростей по средним градациям. Среднеквадратичное отклонение скорости ветра определяется по формуле (2.43), после чего рассчитывается коэффициент вариации скорости ветра по формуле (2.35). На основании полученных значений \bar{V}_0 и C_v определяются параметры двухпараметрического распределения Вейбулла по формулам (2.51) и (2.52). Проверка применимости распределения выполняется по критериям (2.53) - (2.55).

В соответствии с параграфом 2.3.1 выполняется расчёт интегральных энергетических характеристик ветрового потока:

- 1) среднемноголетняя удельная мощность ветра $\bar{N}_{уд}$ по формуле (2.45);
- 2) валовой ветровой потенциал по формуле (2.60).

Указанные величины принимаются в качестве исходных статистически обоснованных характеристик ветрового ресурса.

Переход от непрерывных статистических характеристик ветрового ресурса к непрерывному временному ряду мощности ветроустановки осуществляется на основе выражения удельной энергии ветра.

Из выражения (2.44) следует, что удельная мощность ветрового потока в пределах отдельной градации определяется как:

$$N_{уд,j} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (\bar{V}_j^{гр})^3, \text{ кВт.} \quad (2.61)$$

Таким образом, формула (2.61) представляет собой дискретную интегральную форму кубической зависимости удельной мощности ветроустановки от скорости ветра.

Формирование стохастических значений входных параметров силового преобразователя осуществляется путём перехода от непрерывных вероятностных характеристик ресурса ветра, параметры распределения которых определяются в соответствии с параграфом 2.3.1, к непрерывному случайному временному процессу $V(t)$.

В этом случае мгновенная удельная мощность ветрового потока определяется как непрерывный аналог выражения (2.61):

$$N_{уд}(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^3(t), \text{ кВт.} \quad (2.62)$$

Мгновенная активная мощность ветроэнергетической установки определяется на основе выражения мгновенной удельной мощности ветрового потока, приведенного в формуле (2.62), и на основании формулы (2.44) определения среднемноголетней (годовой) удельной энергии ветрового потока:

$$P_{ВЭУ}(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_p \cdot V^3(t), \text{ кВт,} \quad (2.63)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³; A – полезная площадь поверхности ротора, м²; C_p – коэффициент использования энергии ветра.

Полезная площадь поверхности ротора – это геометрический параметр ветроагрегата, определяемый исходя из диаметра ротора по выражению:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4}, \text{ м}^2, \quad (2.64)$$

где D – диаметр ротора, м.

Коэффициент использования энергии ветра C_p – это безразмерная величина, характеризующая долю кинетической энергии потока, преобразуемую в механическую мощность на валу турбины.

Указанный коэффициент определяется по выражению:

$$C_p = \frac{P_{мех}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3}, \quad (2.65)$$

где $P_{мех}$ – механическая мощность на валу ротора, кВт; V – скорость ветра, м/с.

Исходя из вышеизложенного, непрерывный временной ряд активной мощности ветроустановки $P_{ВЭУ}(t)$ представляет собой развитие интегрального выражения (2.44) в непрерывной форме, при котором дискретное описание ветрового потенциала по градациям скорости трансформируется в динамическую модель активной мощности ветроэнергетической установки.

Таким образом разработанный метод формирования стохастических значений входных параметров силового преобразователя электротехнической системы с ветроустановками позволяет обеспечить переход от непрерывных вероятностных характеристик ресурсов ветра к непрерывным временным рядам

активной мощности $P_{ВЭУ}(t)$, отражающим вероятностный характер изменения климатических условий.

2.4. Выводы по главе 2

1. Разработана методика формирования стохастических значений входных параметров силового преобразователя электротехнической системы на основе ресурсов Солнца, включающая:

- определение непрерывных вероятностных характеристик ресурса Солнца;
- метод формирования стохастических значений входных параметров силового преобразователя на основе ресурсов Солнца, который позволяет перейти от непрерывных вероятностных характеристик ресурса Солнца к непрерывным временному ряду активной мощности фотоэлектрических модулей.

2. Разработана методика формирования стохастических значений входных параметров силового преобразователя электротехнической системы на основе ресурсов ветра, включающая:

- определение непрерывных вероятностных характеристик ресурса ветра;
- метод формирования стохастических значений входных параметров силового преобразователя на основе ресурсов ветра, который позволяет перейти от непрерывных вероятностных характеристик ресурса ветра к непрерывным временному ряду активной мощности ветроустановок.

3. Показано, что непрерывные вероятностные характеристики солнечного и ветрового ресурсов могут быть корректно трансформированы в непрерывные временные ряды активной мощности фотоэлектрических модулей $P_{ФЭМ}(t)$ и ветроэнергетических установок $P_{ВЭУ}(t)$, сохраняющие вероятностные характеристики и структуру исходных климатических данных.

4. Разработанные методики формирования стохастических значений входных параметров силового преобразователя электротехнической системы с возобновляемыми источниками энергии обеспечивают математическую

преемственность между этапом оценки энергетического потенциала ВИЭ и этапом динамического моделирования режимов электротехнической системы, что создаёт основу для разработки математической модели адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности силового преобразователя.

ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СИЛОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

3.1. Формирование стохастических значений входных параметров силового преобразователя электротехнической системы на основе ресурсов Солнца

В соответствии с разработанной во второй главе методикой формирования стохастических значений входных параметров силового преобразователя электротехнической системы на основе ресурсов Солнца, для разработки математической модели адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности силового преобразователя необходимо сформировать исходные данные, определяющие характер изменения активной мощности на стороне постоянного тока.

В качестве силового преобразователя в диссертационной работе исследуется центральный сетевой солнечный инвертор.

Формирование непрерывного временного ряда активной мощности фотоэлектрических модулей на основе ресурсного потенциала солнца выполнено в соответствии с методикой, изложенной в параграфе 2.2 диссертации.

Для формирования исходных данных принята к исследованию точка A с координатами – 65,02 с.ш., 35,70 в.д.

На первом этапе для исследуемой географической точки по базе данных NASA для каждого i -го месяца получены среднемноголетние месячные значения суммарной $\mathcal{E}_{\Sigma i}^{\Gamma}$, прямой $\mathcal{E}_{\text{пр}i}^{\Gamma}$, диффузной $\mathcal{E}_{\text{д}i}^{\Gamma}$ солнечной радиации на горизонтальную площадку при средних условиях облачности, а также CP в космосе $\mathcal{E}_{0i}^{\Gamma}$ и среднемесячные коэффициенты отражательной способности поверхности ρ (о.е.). Годовые вариации CP в точке A приведены на рисунке 3.1.

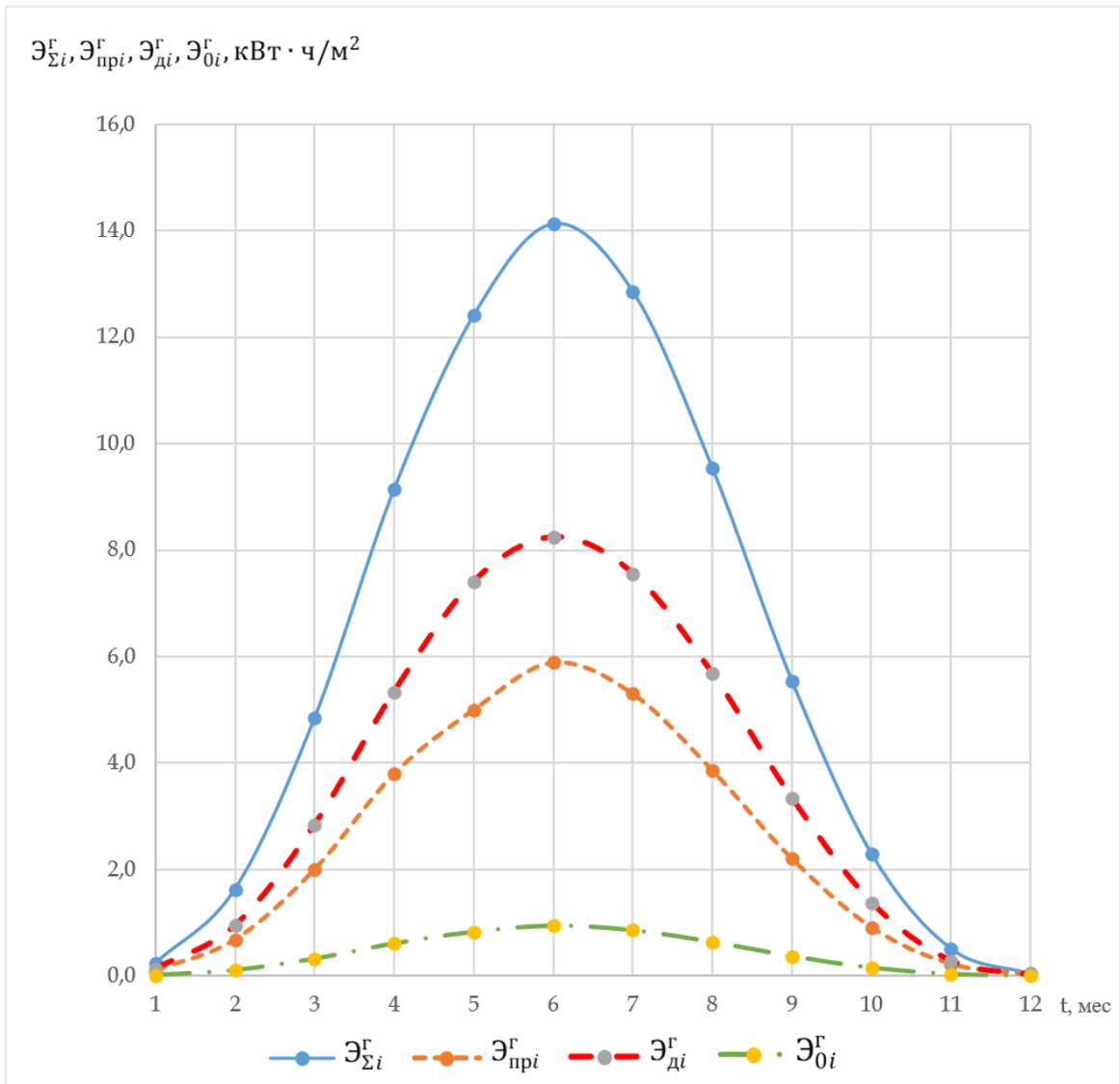


Рисунок 3.1 – Годовые вариации СР в точке А

Для 12-ти характерных дней (\bar{n}_i) каждого i -ого месяца (см. таблицу 2.1) по формулам (2.1)-(2.5) определены суточные характеристики суммарной и диффузной солнечной радиации на горизонтальную площадку с учетом двух моделей расчета: формула Клейна и формула кафедры ГВИЭ. Результаты расчёта приведены в таблице А.1 приложения А и на рисунке 3.2.

Анализ данных, приведённых в таблице А.1 (Приложение А) и на рисунке 3.2, по критерию минимальной среднеквадратической ошибки относительной погрешности (формула (2.6)) показал:

1. Среднеквадратичное отклонение диффузной составляющей $СР$ по формуле кафедры ГВИЭ от фактической составляет 15,927 %; по формуле Клейна – 35,676 %.

2. Наибольшее занижение в определении диффузной составляющей по формуле Клейна наблюдается в зимний период и достигает 41,667 %, а по формуле кафедры ГВИЭ – 18,670 %.

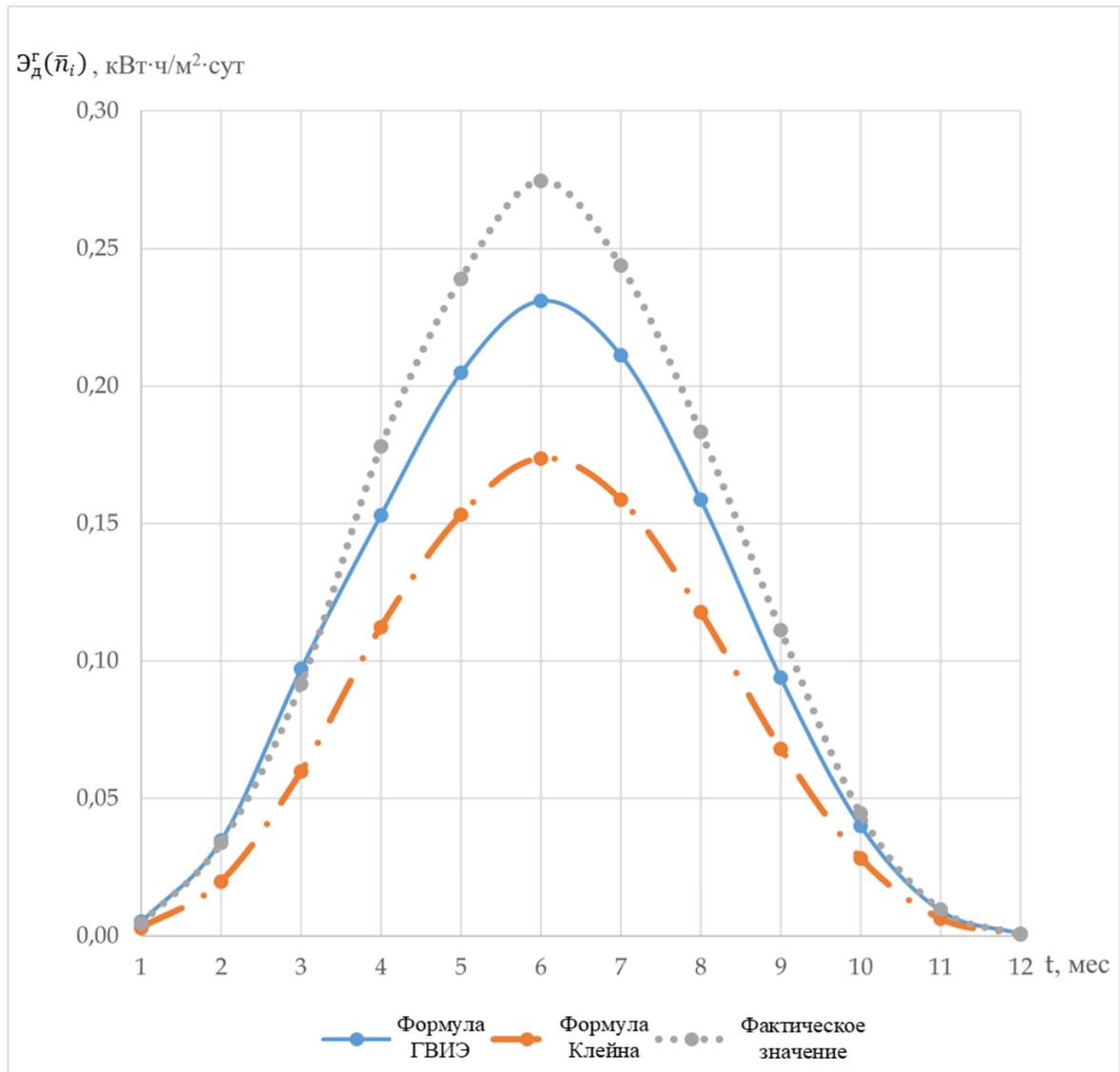


Рисунок 3.2 – Годовые вариации среднегодовой суточной диффузной $СР$ в точке A на горизонтальную поверхность

В соответствии с приведенными выше выводами, для дальнейших расчетов при определении диффузной составляющей $СР$ в точке A выбрана модель кафедры ГВИЭ.

Прямая составляющая СР на горизонтальную площадку для характерного дня каждого месяца $\mathcal{E}_{\text{пр}}^{\Gamma}(\bar{n}_i)$ определена по формуле (2.7).

Расчёт угла склонения солнца – $\delta^{\circ}(\bar{n}_i)$, град.; часового угла солнца в полдень – $\omega^{\circ}(\bar{n}_i)$, град.; угла падения солнца – $\theta^{\circ}(\bar{n}_i)$, град.; максимального значения прямой СР в полдень – $R_{\text{пр}}^{\text{max}}(\bar{n}_i)$, Вт/м²; продолжительности солнечного сияния за сутки – $t_{\text{cc}}(\bar{n}_i)$, ч и приход прямой СР за сутки для 12 характерных дней каждого месяца выполнен по формулам (2.8) - (2.14). Результаты расчета сведены в таблицу 3.1 и представлены на рисунке 3.3. Полученные данные позволяют определить годовой приход прямой СР $\mathcal{E}_{\text{пр}}^{\text{год}} \left(\frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{м}^2\cdot\text{год}} \right)$ и годовую продолжительность солнечного сияния $T_{\text{cc}}^{\text{год}}$ (ч).

Таблица 3.1 – Зависимости $\delta^{\circ}(\bar{n}_i)$, $\theta^{\circ}(\bar{n}_i)$, $\omega^{\circ}(\bar{n}_i)$, $t_{\text{cc}}(\bar{n}_i)$, $R_{\text{пр}}^{\text{max}}(\bar{n}_i)$, $\mathcal{E}_{\text{пр}}^{\Gamma}(\bar{n}_i)$ для 12-ти характерных дней \bar{n}_i каждого месяца в точке А ($\varphi^{\circ} = 65,02^{\circ}$ с.ш.; $\psi^{\circ} = 35,7^{\circ}$ в.д.)

Месяц	\bar{n}_i	$\delta^{\circ}(\bar{n}_i)$, град.	$\omega^{\circ}(\bar{n}_i)$, град.	$\theta^{\circ}(\bar{n}_i)$, град.	$R_{\text{пр}}^{\text{max}}(\bar{n}_i)$, Вт/м ²	$t_{\text{cc}}(\bar{n}_i)$, ч	$\mathcal{E}_{\text{пр}}^{\Gamma}(\bar{n}_i)$, кВт·ч/(м ² ·сут)
1	15	-21,3	5,7	84,8	13,7	7,4	0,1
2	45	-13,6	5,7	78,1	30,9	9,2	0,2
3	74	-2,8	5,7	68,0	56,2	11,4	0,4
4	105	9,4	5,7	55,4	85,0	13,9	0,8
5	135	18,8	5,7	44,6	106,5	16,0	1,1
6	166	23,3	5,7	38,8	116,5	17,2	1,3
7	196	21,5	5,7	41,2	112,6	16,7	1,2
8	227	13,8	5,7	50,5	95,2	14,8	0,9
9	258	2,2	5,7	62,9	68,2	12,4	0,5
10	288	-9,6	5,7	74,4	40,3	10,1	0,3
11	319	-19,1	5,7	82,9	18,5	7,9	0,1
12	349	-23,3	5,7	86,5	9,2	6,8	0,0

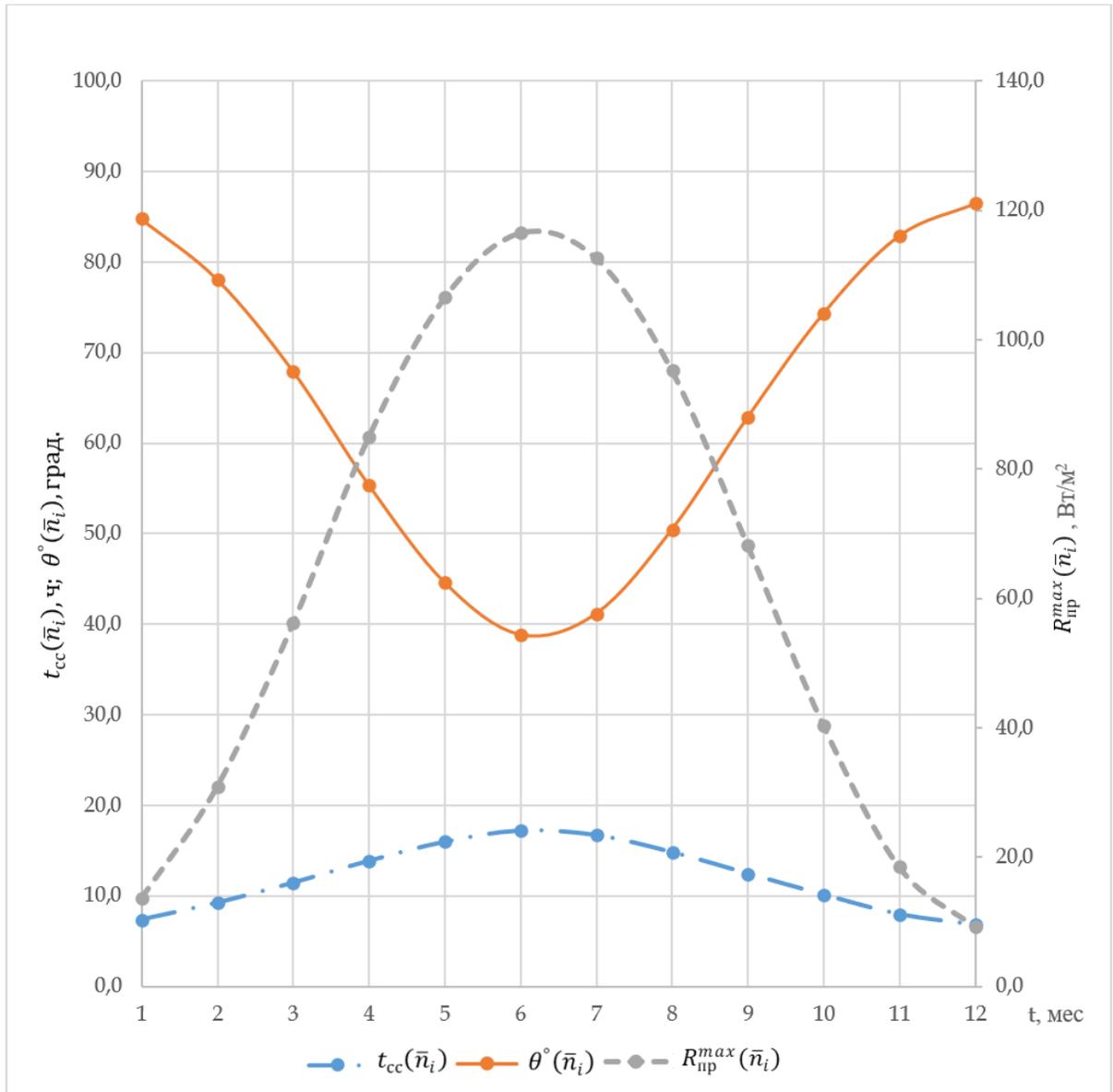


Рисунок 3.3 – Зависимости $\theta^\circ(\bar{n}_i)$, $t_{cc}(\bar{n}_i)$, $R_{pp}^{max}(\bar{n}_i)$
в точке A ($\varphi^\circ = 65,02^\circ$ с.ш.; $\psi^\circ = 35,7^\circ$ в.д.)

Определение годовой продолжительности солнечного сияния и годового прихода прямой солнечной радиации выполнено по формулам (2.15)-(2.16). Итоговые значения приведены в таблице 3.2, а динамика изменения прямой составляющей представлена на рисунке 3.4.

Таблица 3.2 – Определение годового прихода прямой СР $\mathcal{E}_{\text{пр}}^{\text{год}} \left(\frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{м}^2\cdot\text{год}} \right)$ и годовой продолжительности солнечного сияния $T_{\text{сс}}^{\text{год}}$ (час) в точке А ($\varphi^{\circ} = 65,02^{\circ}$ с.ш.; $\psi^{\circ} = 35,7^{\circ}$ в.д.)

Месяц	$t_{\text{сс}}(\bar{n}_i)$, часов за сутки	$\mathcal{E}_{\text{пр}}^{\Gamma}(\bar{n}_i)$, кВт·ч/(м ² ·сут)	N_i , дней	$t_{\text{сс}}$, часов за месяц	$\mathcal{E}_{\text{пр}}^{\Gamma}$, кВт·ч/(м ² ·мес)
1	7,4	0,06	31	228,2	1,99
2	9,2	0,18	28	258,3	5,08
3	11,4	0,41	31	343,4	12,69
4	13,9	0,75	30	430,1	22,52
5	16,0	1,08	31	495,6	33,61
6	17,2	1,28	30	516,7	38,33
7	16,7	1,20	31	518,1	37,14
8	14,8	0,90	31	459,3	27,84
9	12,4	0,54	30	373,2	16,20
10	10,1	0,26	31	312,9	8,03
11	7,9	0,09	30	237,8	2,79
12	6,8	0,04	31	209,9	1,23
Итого	-	-	365	$T_{\text{сс}}^{\text{год}} = 4383,5$ часов	$\mathcal{E}_{\text{пр}}^{\text{год}} = 207,47$ кВт·ч/(м ² ·год)

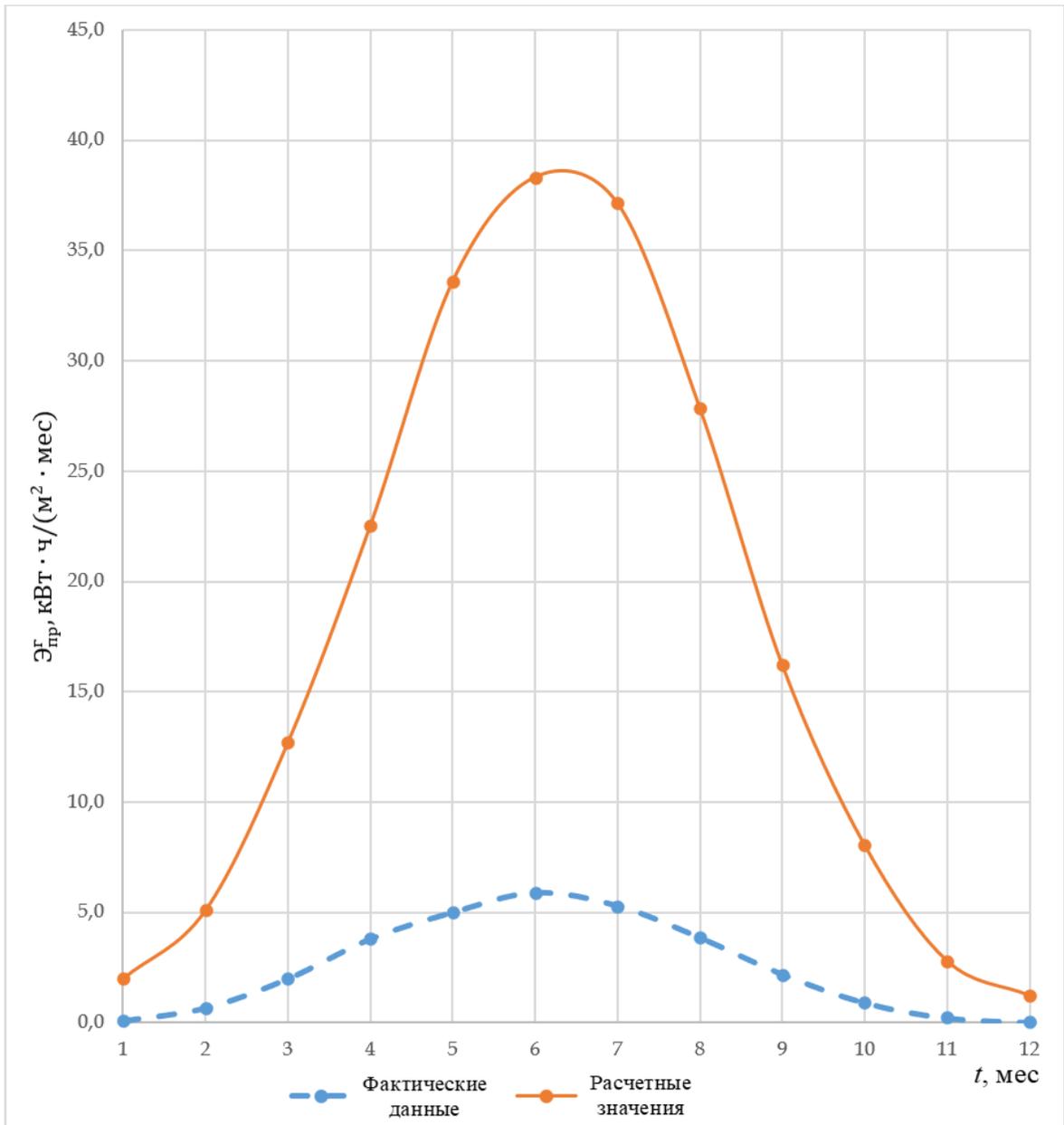


Рисунок 3.4 – Изменение прямой составляющей СР $\bar{E}_{пр}^G$ на горизонтальной площадке в точке А ($\varphi^\circ = 65,02^\circ$ с.ш.; $\psi^\circ = 35,7^\circ$ в.д.)

Сравнение фактических данных с расчётными для условий абсолютно ясного неба (таблица 3.3) показывает, что годовой приход прямой солнечной радиации при ясном небе составляет 207,47 кВт·ч/(м²·год), что задаёт верхнюю границу потенциальной генерации.

Таблица 3.3 – Месячные значения прямой составляющей СР в точке А ($\varphi^\circ = 65,02^\circ$ с.ш.; $\psi^\circ = 35,7^\circ$ в.д.)

Месяц	$\mathcal{E}_{\text{пр}}^{\text{Г}}$, кВт·ч/(м ² ·мес)	
	фактические данные	для абсолютно ясного неба
1	0,10	1,99
2	0,68	5,08
3	2,00	12,69
4	3,80	22,52
5	5,00	33,61
6	5,89	38,33
7	5,30	37,14
8	3,86	27,84
9	2,20	16,20
10	0,91	8,03
11	0,22	2,79
12	0,02	1,23
Итого	29,98 кВт·ч/(м ² ·год)	207,47 кВт·ч/(м ² ·год)

Исходя из изложенного выше, в географической точке А ($\varphi^\circ = 65,02^\circ$ с.ш.; $\psi^\circ = 35,7^\circ$ в.д.), принимая допущение, что погода абсолютно ясная, годовое время солнечного сияния $T_{\text{сс}}^{\text{год}} = 4383,5$ часов, прямая составляющая СР $\mathcal{E}_{\text{год}}^{\text{пр}} = 207,47$ кВт·ч/(м²·год).

Пересчёт солнечной радиации с горизонтальной поверхности на наклонную выполнен по формулам (2.17)-(2.21). Годовое изменение месячных суммарных приходов солнечной радиации на горизонтальную и наклонную площадки представлено на рисунке 3.5, результаты расчета сведены в таблицы Б.1, Б.2 приложения Б. Расчёт для различных углов наклона приведён в таблице 3.4, а зависимость суммарного годового прихода от угла наклона показана на рисунке 3.6.

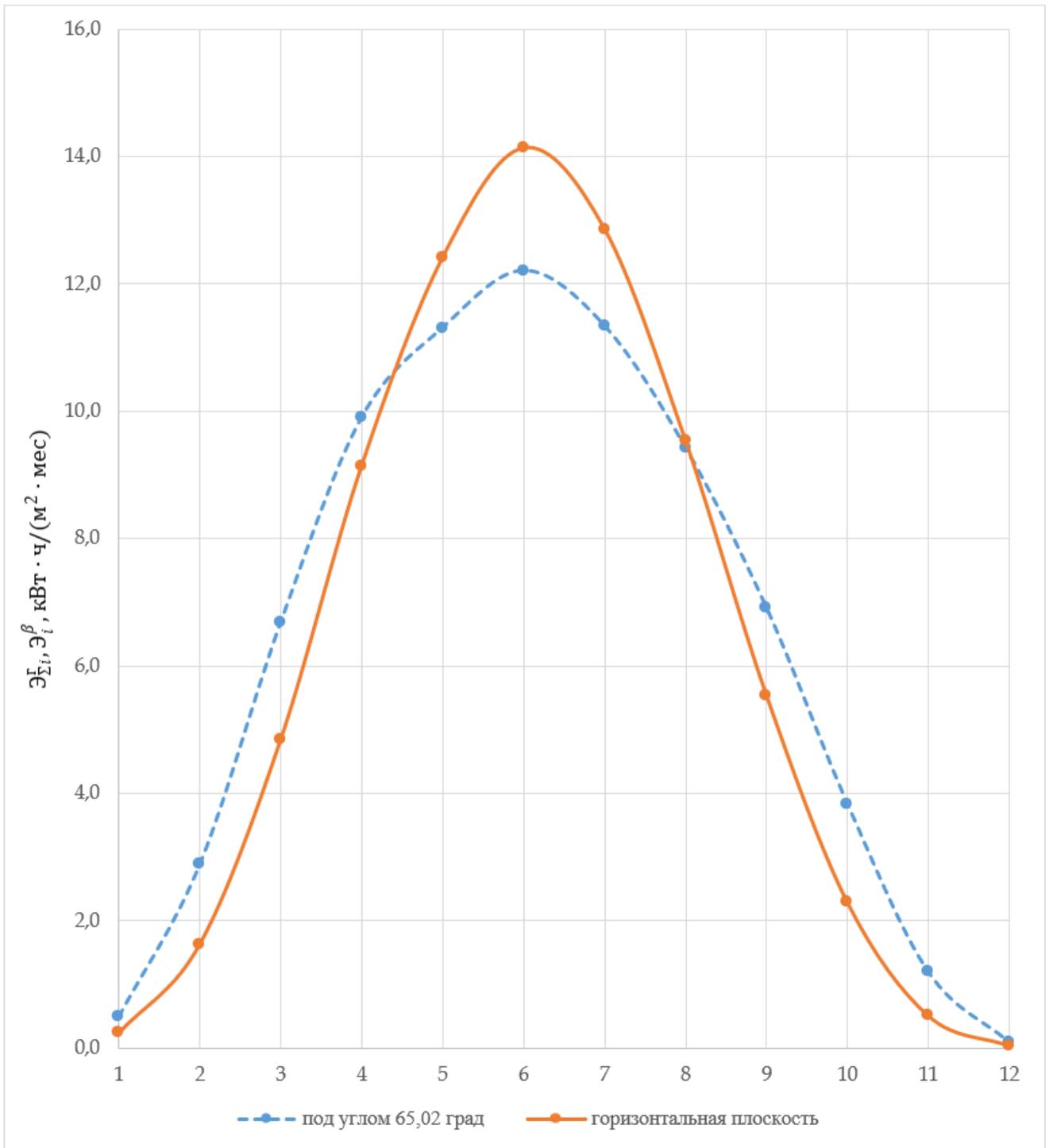


Рисунок 3.5 – Приход суммарной солнечной радиации на горизонтальную и наклонную площадки в точке A ($\varphi^\circ = 65,02^\circ$ с.ш.; $\psi^\circ = 35,7^\circ$ в.д.)

Таблица 3.4 – Расчёт \mathcal{E}_i^β для $0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ в точке А ($\varphi^\circ = 65,02^\circ$ с.ш.; $\psi^\circ = 35,7^\circ$ в.д.)

$\mathcal{E}_i^\beta, \text{кВт} \cdot \text{ч}/(\text{м}^2 \cdot \text{мес})$										
мес.	$\beta, \text{град}$									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
1	0,25	0,55	0,84	1,11	1,35	1,55	1,70	1,81	1,86	1,86
2	1,75	2,47	3,13	3,71	4,20	4,58	4,84	4,97	4,97	4,83
3	5,75	6,53	7,19	7,70	8,05	8,23	8,23	8,06	7,72	7,21
4	9,85	10,60	11,14	11,46	11,53	11,35	10,92	10,26	9,38	8,32
5	13,16	13,44	13,57	13,47	13,12	12,52	11,69	10,64	9,40	8,02
6	15,05	15,04	14,96	14,66	14,12	13,32	12,30	11,06	9,66	8,13
7	13,71	13,81	13,81	13,60	13,15	12,46	11,55	10,44	9,17	7,77
8	10,17	10,65	10,97	11,07	10,95	10,61	10,05	9,29	8,35	7,26
9	5,91	6,71	7,37	7,85	8,15	8,26	8,17	7,89	7,42	6,79
10	2,48	3,25	3,96	4,57	5,06	5,43	5,65	5,73	5,66	5,44
11	0,58	1,12	1,64	2,11	2,52	2,87	3,13	3,30	3,39	3,37
12	0,05	0,14	0,23	0,31	0,39	0,45	0,50	0,54	0,56	0,56
Год	78,71	84,31	88,81	91,62	92,59	91,63	88,73	83,99	77,54	69,56

Примечание: желтым цветом в таблице выделены значения среднемесячного суточного прихода суммарной солнечной радиации, соответствующие оптимальному углу наклона для каждого месяца.

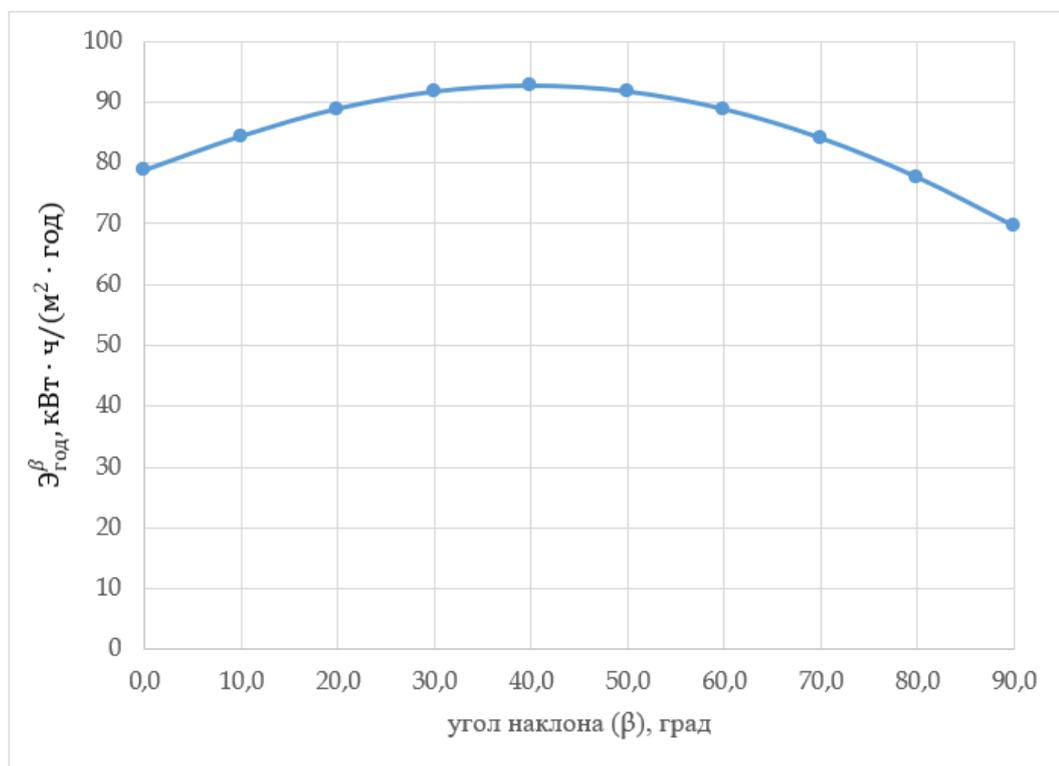


Рисунок 3.6 – Изменение суммарного годового прихода СР в зависимости от угла наклона приемной площадки

Исходя из изложенного, суммарный годовой приход СР на наклонённую приёмную площадку единичной площади ($S = 1 \text{ м}^2$) с углом наклона к горизонту $\beta \equiv \varphi^\circ$ на 4,1 % выше, чем на горизонтальную площадку.

Оптимальные углы наклона в зависимости от полученной энергии, определенные по таблице 3.4, приведены в таблице 3.5. Месячные суммарные приходы СР на площадки для разных значений β приведены на рисунке 3.7.

Таблица 3.5 – Оптимальные углы наклона площадки $\beta_{\text{опт}}$, соответствующие максимуму получаемой СР

Параметр	Месяц												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
$\beta_{\text{опт}}$, град.	80	70	50	30	20	0	10	30	50	70	80	80	40
$\frac{Э_i^\beta}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$ $\frac{\text{М}^2 \cdot \text{мес}}$	1,86	4,97	8,23	11,46	13,57	15,05	13,81	11,07	8,26	5,73	3,39	0,56	92,59

Анализ данных (таблица 3.5, рисунок 3.7) показал, что оптимальный угол наклона приёмной площадки для года в целом составляет $\beta = 40^\circ$, при этом годовой приход солнечной радиации увеличивается на 10,13 % по сравнению с горизонтальной поверхностью. В зимние месяцы прирост энергии достигает 70 %, что существенно влияет на сезонную структуру активной мощности фотоэлектрической генерации.

Таким образом, на основании расчётов, представленных в таблицах 3.1-3.5, А.1, Б.1, Б.2 и на рисунках 3.1-3.7, сформированы интегральные характеристики солнечного ресурса с учетом угла наклона фотоэлектрических модулей, определяющие диапазон изменения активной мощности фотоэлектрического массива.

На основе рассчитанных интегральных характеристик солнечного ресурса сформированы непрерывные временные ряды активной мощности $P_{\text{ФЭМ}}(t)$ в соответствии с формулами (2.22)-(2.33), что обеспечивает переход от непрерывных вероятностных характеристик ресурсов Солнца к электрическим параметрам, определяющим режим работы звена постоянного тока силового преобразователя.

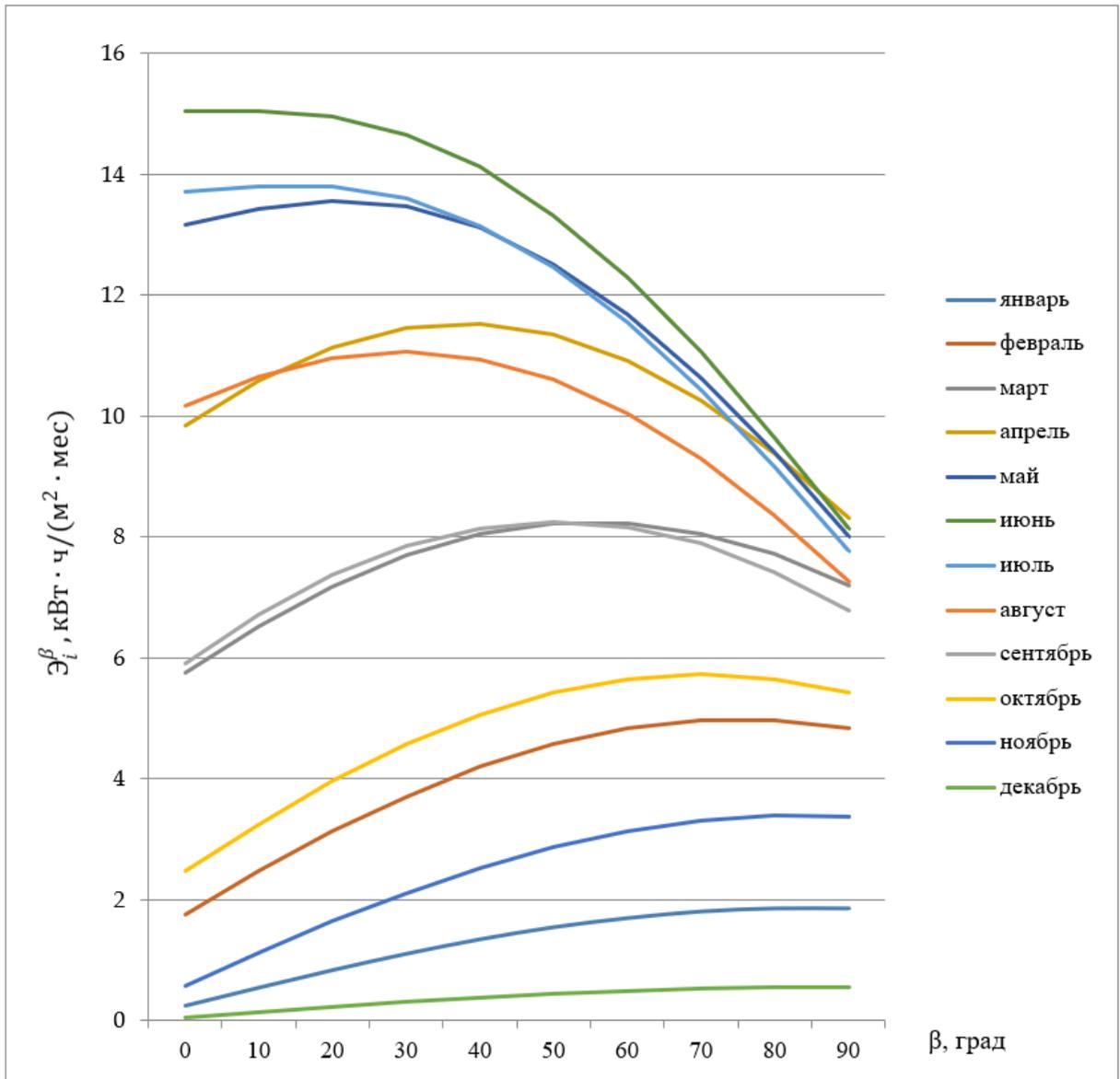


Рисунок 3.7 – Месячные суммарные приходы СР на площадки для разных значений β

Расчёты ветрового ресурса, выполненные в соответствии с методикой главы 2, приведены в Приложении В. Результаты расчетов могут быть использованы при моделировании ветроэнергетических установок, в которых в качестве преобразовательного оборудования используется конвертер с собственной схемотехникой и принципами регулирования, отличающийся по структуре и алгоритмам управления от исследуемого в диссертационной работе центрального сетевого солнечного инвертора.

Стохастический характер изменения солнечной генерации непосредственно влияет на ограничение по полной мощности инвертора, а следовательно,

определяет допустимый диапазон регулирования реактивной мощности. В соответствии с изложенным требуется разработка, моделирование и апробация адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности, способного оперативно реагировать на изменения входных и выходных параметров силового преобразователя. Это позволит оценить его динамику, устойчивость и соответствие реальным условиям эксплуатации.

3.2. Разработка математической модели адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности силового преобразователя электротехнической системы с ВИЭ

Разработка адаптивных систем управления энергетическими установками на основе ВИЭ требует не только теоретического обоснования алгоритмов регулирования, но и их математической формализации с последующей верификацией в программной среде. Особенно важной задачей является управление реактивной мощностью, поскольку её неконтролируемые колебания могут приводить к ухудшению показателей качества электроэнергии, перегрузке оборудования и нестабильной работе инверторов [41].

Большую часть времени сетевые инверторы, используемые в составе фотоэлектрических станций, функционируют в режиме генерации исключительно активной мощности, при этом реактивная составляющая отсутствует или приближается к нулю. Это объясняется как энергетической политикой сетевых операторов, направленной на минимизацию искажений параметров напряжения, так и особенностями самого оборудования, которое на этапе запуска и базовой настройки чаще всего ориентировано на работу при коэффициенте мощности $\cos \varphi \approx 1$, то есть в режиме чисто активной нагрузки. В таких условиях можно с достаточной степенью приближения принимать, что полная мощность инвертора S эквивалентна активной мощности P :

$$S = P \text{ при } \cos \varphi = 1. \quad (3.1)$$

Однако в определённых эксплуатационных сценариях, особенно при подключении инверторных установок к слабым или нестабильным сетям, возникает необходимость в регулировании реактивной мощности. Для обеспечения этого режима инвертору требуется перераспределить баланс между активной и реактивной составляющими мощности, при этом ограничив активную мощность с целью высвобождения части энергетического ресурса под реактивную составляющую [39, 42].

С этой целью предлагается искусственно занижать максимально допустимую полную мощность инвертора на 1% от номинального значения. Это значение принимается исходя из типового регулировочного запаса современных силовых преобразователей. Таким образом, новая эффективная полная мощность принимается равной:

$$S' = S \cdot 0,99, \text{ кВА}, \quad (3.2)$$

где S – номинальная полная мощность, кВА; S' – ограниченная (перераспределённая) полная мощность, необходимая для расчёта допустимых границ реактивной составляющей. Параллельно с этим снижается и активная составляющая мощности P , которая пересчитывается через коэффициент мощности по формуле:

$$P = S' \cdot \cos \varphi, \text{ кВт}. \quad (3.3)$$

При этом предельная (максимальная) реактивная мощность Q_{max} , которую инвертор может обеспечить при заданных условиях, определяется из соотношения между ограниченной полной мощностью и активной составляющей мощности:

$$Q_{max} = \sqrt{S'^2 - P^2}, \text{ кВАр}. \quad (3.4)$$

В условиях реальной эксплуатации приведенный расчёт необходимо сопоставлять с текущими измеренными параметрами инвертора. Для этого используется формула расчёта доступной реактивной мощности, основанная на текущем значении выходного напряжения инвертора $U_{inv t}$ и выходного тока инвертора $I_{inv t}$, фиксируемых средствами телеметрии:

$$Q_{\text{доступ } t} = \frac{U_{inv t} \cdot I_{inv t} \cdot 0,72}{1000}, \text{ кВАр}, \quad (3.5)$$

где t – периодичность расчета уставки реактивной мощности, с; $U_{inv t}$ – выходное напряжение инвертора, В; $I_{inv t}$ – выходной ток инвертора, А; 0,72 – константа, выведенная на базе лаборатории ООО «Парус электро» опытным путем.

В ходе функционирования системы управления инвертором, текущая уставка реактивной мощности $Q_{уставка t}$ должна адаптироваться на основании сравнения между двумя величинами: Q_{max} и $Q_{доступ t}$. Уставка при этом принимается равной минимальному из этих значений, то есть:

$$Q_{уставка t} = \min(Q_{max}, Q_{доступ t}), \text{ кВАр.} \quad (3.6)$$

Следует учитывать, что параметры входного постоянного напряжения (DC) оказывают значительное влияние на допустимые значения выходного переменного напряжения (AC), особенно в высоконагруженных и нестабильных режимах работы инвертора [39]. Это связано с тем, что при снижении напряжения на стороне постоянного тока, инвертор теряет способность поддерживать требуемые значения выходного напряжения, не выходя за пределы допуска, заданного характеристиками силовых ключей (например, IGBT).

В реальном времени максимальная уставка сравнивается с расчётной уставкой. Уставка принимается либо равной максимальной, либо меньше в соответствии с рассчитанным значением. Поскольку параметры ВИЭ носят стохастический характер, отражающийся на входных параметрах преобразовательных установок, то режим компенсации реактивной мощности инверторов должен учитывать зависимость от входного постоянного напряжения [40]. При этом допустимое рабочее значение выходного напряжения инвертора $U_{inv t}$ должно соответствовать условию:

$$0,99 \cdot U_{inv t} < \frac{U_{DC t}}{\sqrt{2}} - \Delta U_{IGBT}, \quad (3.7)$$

где $U_{DC t}$ – входное постоянное напряжение инвертора, В; ΔU_{IGBT} – допуск или ограничение, связанное с потерей на преобразование, В.

С периодичностью t при задании уставки адаптивный алгоритм должен проверять условие (3.7), в случае невыполнения указанного условия, то есть при

$$U_{inv\ t} \geq \frac{U_{DC\ t} - \Delta U_{IGBT}}{\sqrt{2} \cdot 0,99} - \text{происходит снижение реактивной мощности шагами по 10\%}.$$

Если указанное выше условие перестаёт выполняться или приближается к критическому значению, адаптивный алгоритм автоматически начинает пошаговое снижение уставки реактивной мощности. В частности, при превышении порога допустимого выходного напряжения, уставка снижается на 10% от предыдущего значения уставки, при этом повторные несоответствия в течение нескольких итераций влекут дальнейшее снижение уставки также на 10%.

Дополнительно адаптивный алгоритм выполняет проверку соблюдения допустимого диапазона рабочего выходного напряжения. Предельные значения определяются с некоторыми предельными коэффициентами, которые создают гистерезисную зону вокруг номинальных значений:

$$1,01 \cdot U_{inv.min} < U_{inv\ t} < 0,99 \cdot U_{inv.max}. \quad (3.8)$$

Таким образом, математические выражения (3.2) – (3.8) формализуют разработанную математическую модель адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности силового преобразователя, которая учитывает стохастическую природу возобновляемых источников энергии и значения выходных параметров силового преобразователя.

На основе вышеприведенной математической модели адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности итоговую логику регулирования уставки реактивной мощности можно описать следующим образом:

1. Если

$$U_{inv\ t} < \frac{U_{DC\ t} - \Delta U_{IGBT}}{\sqrt{2} \cdot 0,99}$$

И

$$1,01 \cdot U_{inv.min} < U_{inv\ t} < 0,99 \cdot U_{inv.max},$$

то

$$Q_{уставка\ t} = \min(Q_{max}, Q_{доступ\ t}), \text{ кВАр}.$$

2. Если

$$U_{inv t} \geq \frac{\frac{U_{DC t}}{\sqrt{2}} - \Delta U_{IGBT}}{0,99}$$

ИЛИ

$$U_{inv t} < 1,01 \cdot U_{inv.min}$$

ИЛИ

$$U_{inv t} > 0,99 \cdot U_{inv.max},$$

то

$$Q_{уставка t} = 0,9 \cdot Q_{уставка t-1}, \text{ кВар.}$$

На рисунке 3.8 представлена блок-схема разработанной математической модели алгоритма регулирования реактивной мощности преобразовательного устройства электротехнической системы с ВИЭ.

В соответствии с блок-схемой, приведенной на рисунке 3.8, работу адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности силового преобразователя можно описать следующим образом.

В качестве исходных данных для адаптивного алгоритма задаются паспортные данные силового преобразователя (инвертора) – полная мощность S ; коэффициент мощности $\cos \varphi$; допустимый диапазон выходного переменного напряжения $U_{inv.min}$, $U_{inv.max}$; значение падения напряжения на силовых модулях ΔU_{IGBT} .

Следующим шагом искусственно уменьшается доступная полная мощность до значения $S' = S \cdot 0,99$ (выражение (3.2)) и пересчитывается уставка активной мощности $P = S' \cdot \cos \varphi$ (выражение 3.3)). Затем в соответствии с выражением (3.4) вычисляется теоретически доступное значение реактивной мощности Q_{max} .

Следующим шагом алгоритм с периодичностью t считывает параметры инвертора ($U_{DC t}$, $U_{inv t}$, $I_{inv t}$) и в соответствии с выражением (3.5) определяется текущая доступная реактивная мощность $Q_{доступ t}$.

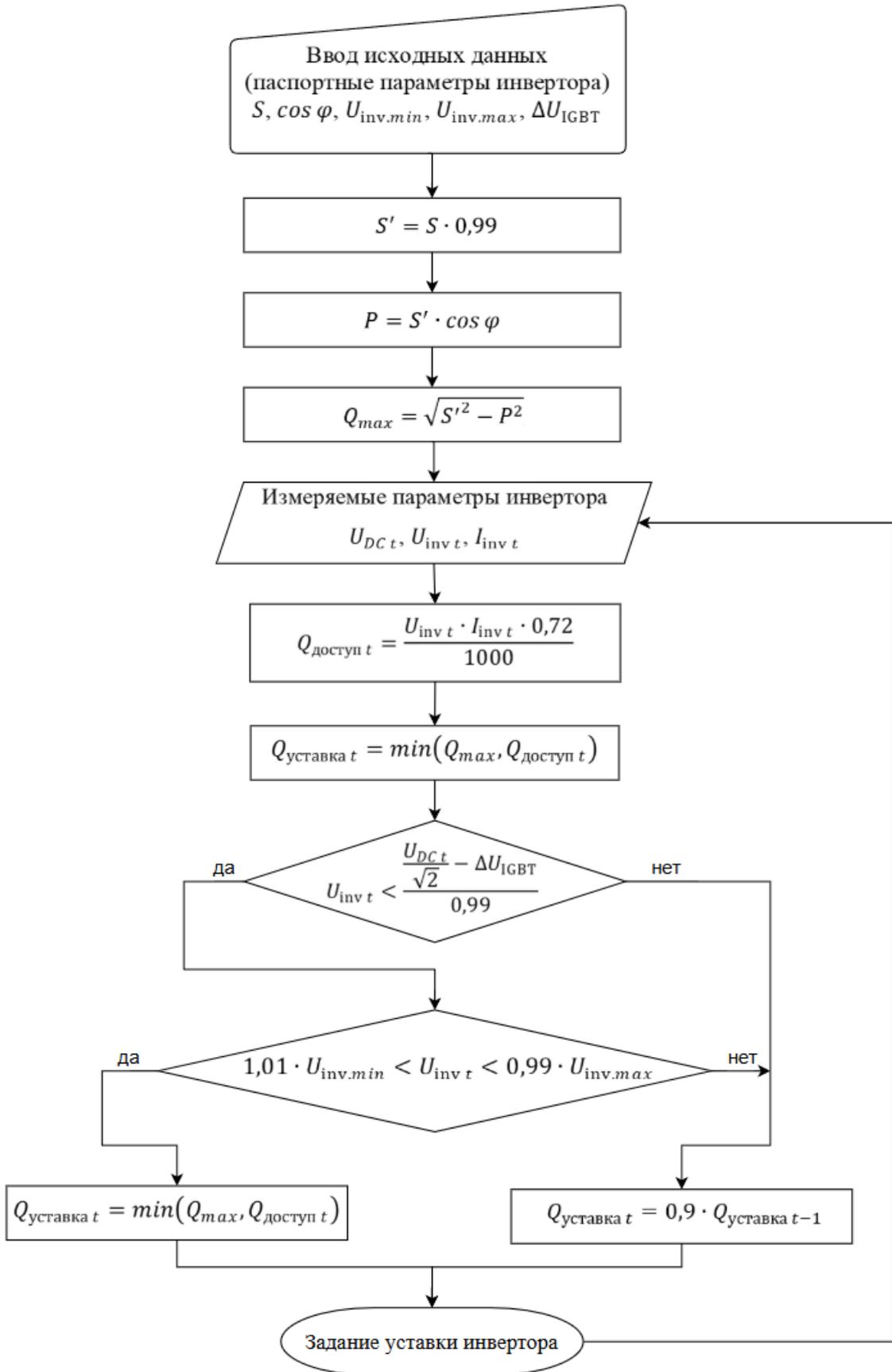


Рисунок 3.8 – Блок-схема математической модели адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности силового преобразователя электротехнической системы с ВИЭ

В качестве уставки в соответствии с выражением (3.6) принимается минимальное из определенных выше значений уставки реактивной мощности:

$$Q_{\text{уставка } t} = \min(Q_{\text{max}}, Q_{\text{доступ } t}).$$

Далее проверяются условия по допустимому выходному напряжению (выражение (3.7)) и гистерезисный диапазон работы (выражение (3.8)). Если оба условия выполняются – принятая уставка остаётся без изменений. При нарушении любого условия уставка снижается на 10% от ранее принятого значения уставки ($Q_{\text{уставка } t} = 0,9 \cdot Q_{\text{уставка } t-1}$).

Принятое значение уставки задаётся на инвертор и цикл расчета и формирования уставки повторяется. При повторных нарушениях условий, описываемых выражениями (3.7) - (3.8) уставка повторно уменьшается на 10% (шагами), пока параметры инвертора не вернуться в допустимую область.

В диссертационной работе периодичность формирования уставки реактивной мощности силового преобразователя принята $t = 1$ секунда, что обеспечивает адаптивную реакцию электротехнической системы на флуктуации входных параметров постоянного тока и выходных параметров переменного тока, а также защищает инвертор от выхода за технологические ограничения.

Таким образом, разработанная математическая модель адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности представляет собой динамическую систему, ориентированную на реагирование на текущее состояние как входной, так и выходной части инвертора, с учётом технологических ограничений и электромагнитной совместимости.

Дальнейшая реализация разработанного алгоритма в программной среде MATLAB позволит произвести его верификацию и сформировать базу для интеграции в промышленные SCADA-решения.

3.3. Разработка имитационной модели центрального сетевого солнечного инвертора с адаптивным регулированием реактивной мощности в программной среде MATLAB/Simulink

Для проведения верификации разработанного адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности и оценки его функционирования в условиях переменных режимов генерации и сетевой нагрузки, в программной среде MATLAB/Simulink разработана имитационная модель центрального сетевого солнечного инвертора.

В основу модели положен принцип трёхфазного трёхуровневого инвертора (Neutral Point Clamped - NPC), представленного на рисунке 3.9, с возможностью формирования уставок как по активной, так и по реактивной мощности.

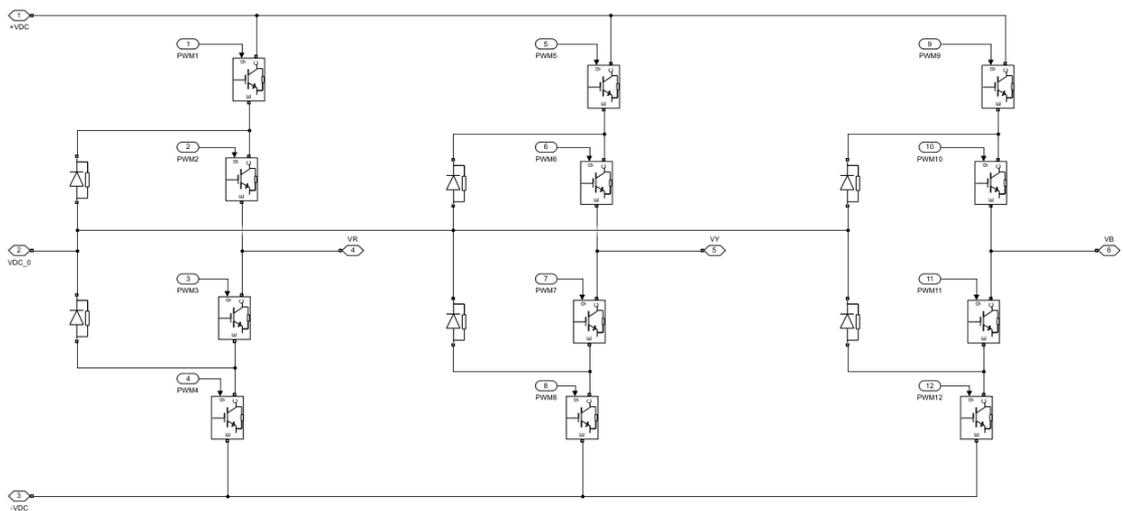


Рисунок 3.9 – Модель трёхфазного трёхуровневого инвертора с фиксированной нейтральной точкой

Характер работы силового преобразователя солнечной электростанции существенно изменяется в течение суток в зависимости от уровня инсоляции и, как следствие, от величины генерируемой мощности.

В дневное время при достаточном уровне освещённости солнечные панели вырабатывают электрическую энергию, поступающую на вход трёхуровневого NPC-инвертора. Инвертор преобразует постоянный ток в переменный и передаёт мощность в сеть, обеспечивая синхронизацию с сетевым напряжением. В этом

режиме система управления обеспечивает независимое регулирование активной и реактивной мощности: приоритет отдаётся максимальной выдаче активной мощности от панелей, тогда как регулирование реактивной мощности направлено на поддержание заданного коэффициента мощности в точке подключения к сети или на стабилизацию уровня напряжения – особенно актуальную для слабых и протяжённых сетей. Баланс между составляющими мощности определяется системой управления на основании текущей выработки и требований сети.

В ночное время, когда генерация солнечных панелей отсутствует, инвертор не отключается. В этом режиме он функционирует в режиме STATCOM, обеспечивая выдачу реактивной мощности, поддержание уровня напряжения и фильтрацию высших гармоник [31]. Одновременно система переходит в режим готовности, обеспечивая оперативное возобновление генерации при восстановлении инсоляции.

Система управления инвертором реализована на основе векторного управления с ориентацией по полю во вращающейся системе координат dq . В дневном режиме система управления включает внутренние контуры регулирования тока по осям d и q с ПИ-регуляторами, обеспечивающими высокое быстродействие и точность формирования выходного тока инвертора. Внешние контуры управления также построены на базе ПИ-регуляторов и обеспечивают регулирование активной и реактивной мощности. Уставка активной мощности определяется выработкой солнечных панелей, а уставка реактивной мощности – условием поддержания заданного коэффициента мощности или напряжения в точке подключения к сети. Выходные сигналы контуров мощности ограничиваются допустимым током инвертора с приоритетом активной мощности в дневном режиме. Выходные сигналы токовых регуляторов ограничиваются по напряжению звена постоянного тока в текущий момент времени, что обеспечивает корректную работу системы при изменениях напряжения на конденсаторах DC-звена.

В ночном режиме структура управления автоматически перестраивается: контур управления активной мощностью заменяется ПИ-регулятором

стабилизации напряжения DC-звена. Это обеспечивает поддержание заряда конденсаторов DC-звена за счёт потребления небольшого количества активной мощности из сети для компенсации потерь в преобразователе [32]. Контур управления реактивной мощностью при этом сохраняет работоспособность, обеспечивая поддержку сети.

В трёхуровневых NPC-преобразователях применяются различные методы широтно-импульсной модуляции – от синусоидальной ШИМ до пространственно-векторной модуляции (SVPWM). Ключевым требованием к работе таких преобразователей является балансировка потенциала нейтральной точки: её нарушение может привести к перегрузке силовых ключей по напряжению и искажению выходного напряжения.

Пространственно-векторная ШИМ обеспечивает повышение использования напряжения DC-звена (до 15 % по сравнению с синусоидальной ШИМ) и снижение динамических потерь на переключение. Вместе с тем данный метод имеет существенный недостаток: из-за влияния мёртвого времени вблизи границ секторов, при малых амплитудах напряжения и соответственно малых скважностях, точное воспроизведение опорных векторов напряжения затруднено.

Для преодоления указанных ограничений в модели реализован метод, основанный на «плавающем» потенциале фазы между отрицательной и положительной шиной DC-звена. Предложенный блок модели – модуль ШИМ, представленный на рисунке 3.10, сочетает использование полного напряжения DC-звена с принципами пространственно-векторной модуляции, однако в отличие от классического SVPWM все ключи инвертора переключаются в каждый период модуляции. Это несколько увеличивает динамические потери на переключение, но даёт значительные преимущества: векторы напряжения с малой амплитудой формируются при скважностях около 50%, что обеспечивает линейную зависимость между скважностями и линейными напряжениями.

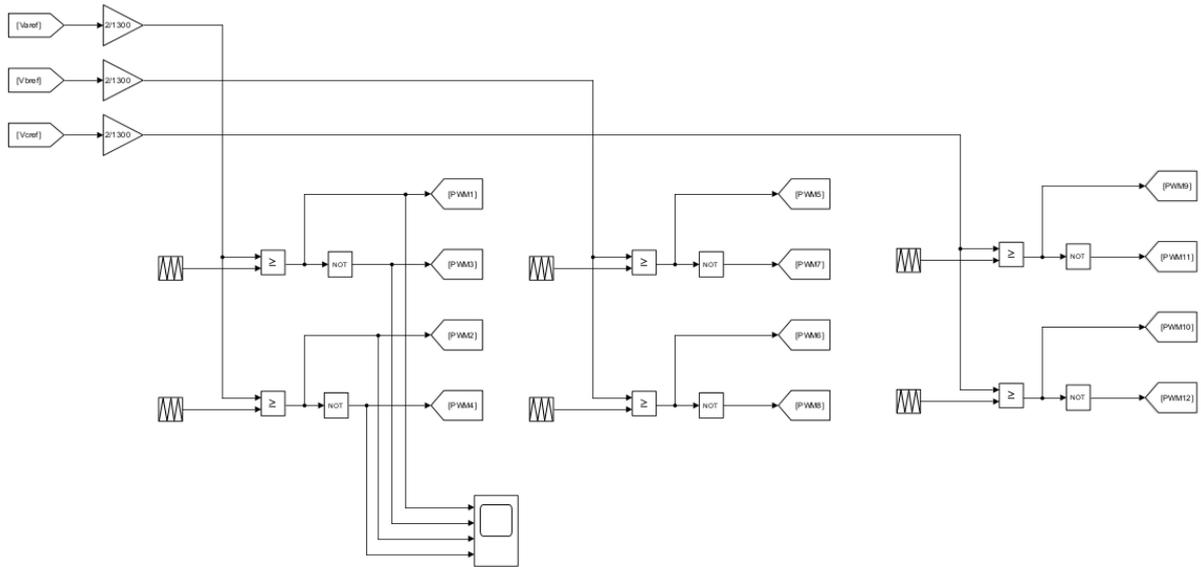


Рисунок 3.10 – Модель модуля ШИМ

Существенным достоинством алгоритма является эффективная балансировка нейтральной точки: при возникновении дисбаланса алгоритм корректирует скважности управляющих импульсов за счёт изменения добавки к фазному потенциалу, что регулирует длительность подключения фазы к нейтральной точке и, соответственно, ток заряда конденсаторов.

Нелинейность, вносимая мёртвым временем, проявляется только в момент смены направления фазного тока. Для её компенсации возможно применение программных методов анализа направления тока либо аппаратных решений на базе программируемых логических матриц, контролирующих расхождение между опорным сигналом и реальным выходным напряжением инвертора [34].

Схема разработанной имитационной модели центрального сетевого солнечного инвертора в составе электротехнической системы с возобновляемыми источниками энергии в программной среде MATLAB/Simulink представлена на рисунке 3.11 и охватывает все основные функциональные блоки, соответствующие структуре реального инверторного оборудования.

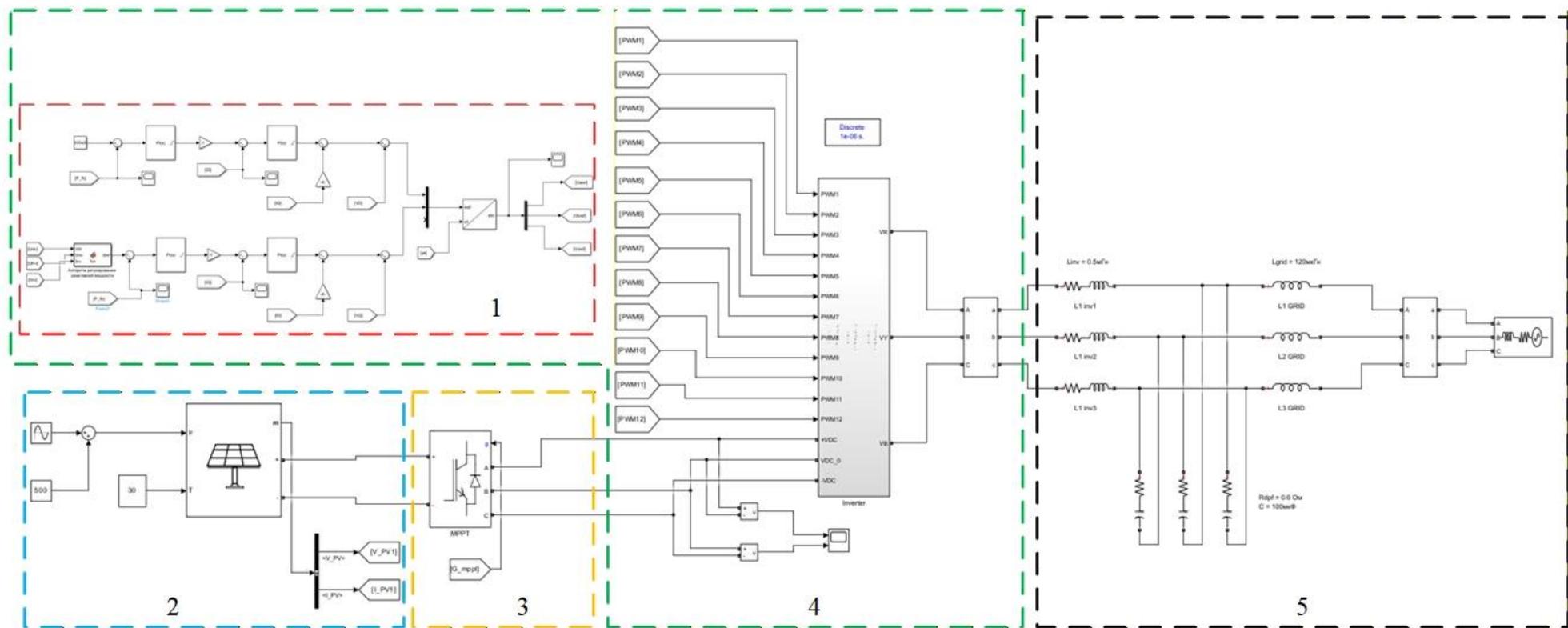


Рисунок 3.11 – Имитационная модель центрального солнечного инвертора в составе электротехнической системы с возобновляемыми источниками энергии в программной среде MATLAB/Simulink:

- 1) Контуры управления активной мощностью и адаптивного регулирования реактивной мощности;
- 2) Источник постоянного тока (PV-массив); 3) МРРТ-блок; 4) Силовой трёхуровневый инвертор с ШИМ;
- 5) LC-фильтр, сетевая нагрузка и повышающий трансформатор

В состав имитационной модели входят следующие компоненты:

- Источник постоянного тока (PV-массив), приведённый на рисунке 3.12 – представлен блоками PV-панелей, формирующими входное напряжение и ток в зависимости от входных непрерывных временных рядов мощности генерации, учитывающих климатические условия (в частности, уровень инсоляции) [23].

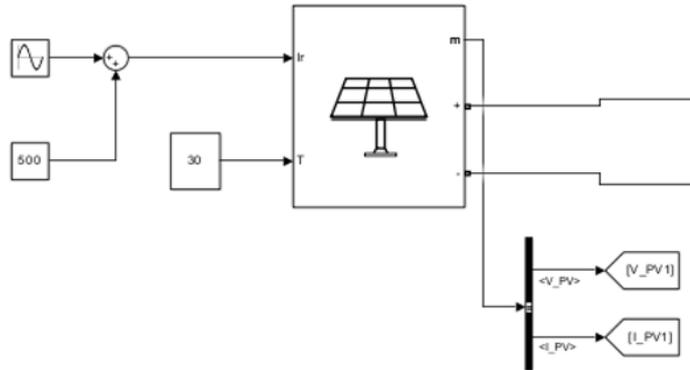


Рисунок 3.12 – Модель источника постоянного тока (PV-массив)

- MPPT-блок, представленный на рисунке 3.13 – реализует алгоритм отслеживания точки максимальной мощности, адаптирующийся к изменениям напряжения на входе. Алгоритм может быть выбран из набора: P&O, INC, или PSO (при расширенной модели).

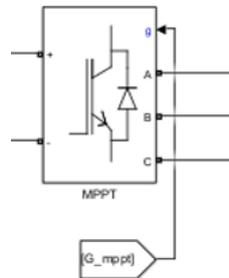


Рисунок 3.13 – Модель блока MPPT

- Контур управления активной мощностью – предназначен для стабилизации выработки активной составляющей в соответствии с расчётной уставкой, поступающей от MPPT или SCADA.

- Контур адаптивного регулирования реактивной мощности – реализует разработанную математическую модель адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности, обеспечивающую выбор уставки реактивной мощности: минимальное из значений – рассчитанное на основании текущих измерений

параметров инвертора и определенное по допустимым значениями параметров инвертора (выражения 3.2–3.4). В логике реализовано пошаговое снижение уставки при достижении граничных значений по входному или выходному напряжению.

Контуры управления активной мощностью и адаптивного регулирования реактивной мощности являются функционально независимыми по формированию уставок, однако, реализуются в общей dq -системе координат и учитывают взаимосвязь активной и реактивной составляющих полной мощности инвертора. Исходя из взаимосвязи данных блоков целесообразна их реализация в составе одного блока структурной модели, приведённой на рисунке 3.14.

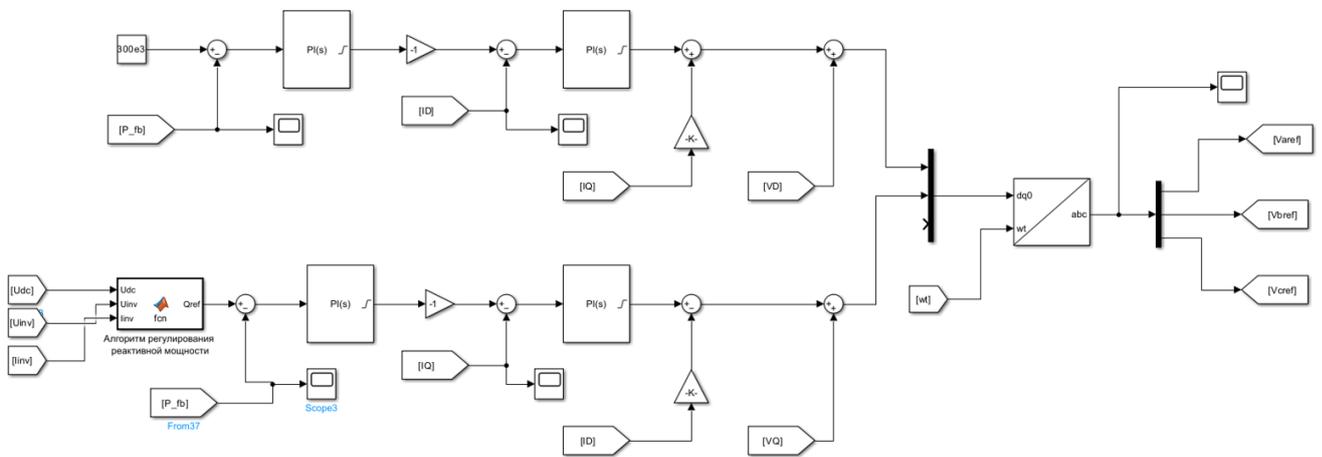


Рисунок 3.14 – Модель контура управления активной мощностью и контура адаптивного регулирования реактивной мощности

- Блок измерений (Measurement Block) – формирует данные о текущих значениях напряжения и тока как на стороне DC, так и AC, с выводом на контроллер (рис. 3.15).

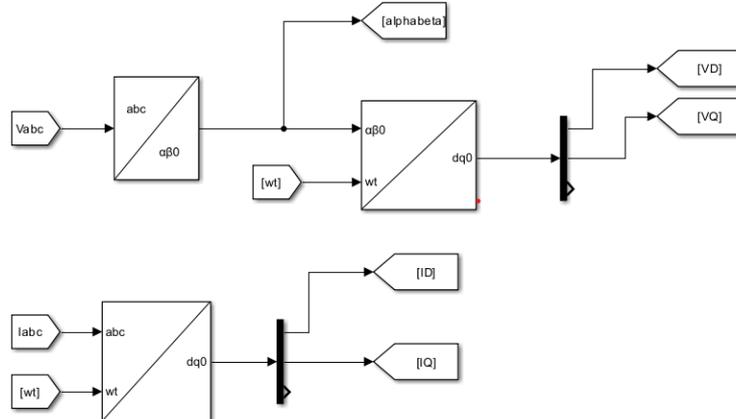


Рисунок 3.15 – Модель блока измерений

- Блок генерации ШИМ-сигналов – преобразует сигналы управления по токам и напряжению в управляющие импульсы для ключей NPC-инвертора. В модели применяются генераторы ШИМ с модуляцией по напряжению (VSI) и синхронизацией по частоте сети.

- Силовой трёхуровневый инвертор (NPC) – выполняет преобразование энергии с постоянного на переменное напряжение. Внутренняя топология реализована с использованием ключей, моделируемых как идеальные переключатели или с учётом реальных параметров (при необходимости – IGBT с падением напряжения и временем переключения).

- LC-фильтр – выполняет сглаживание высокочастотной составляющей после ШИМ и формирует синусоидальное выходное напряжение.

- Сетевая нагрузка и повышающий трансформатор – эмулируют подключение к внешней сети, учитывая параметры нагрузки и напряжение 0,4/6-10 кВ.

Особое внимание в разработке имитационной модели уделено взаимодействию между блоком контроля и блоком измерений. Каждый такт симуляции включает пересчёт уставки реактивной мощности с учётом текущих значений входного постоянного напряжения $U_{DC t}$, выходного переменного напряжения $U_{inv t}$, а также действующих ограничений, определённых в формализованной части алгоритма. Данные поступают в управляющий блок, который корректирует уставку $Q_{уставка t}$ и формирует сигнал $I_{q ref}$ для регулирования тока реактивной составляющей.

Также в имитационную модель включён динамический модуль генерации инсоляции, который обеспечивает моделирование реальных условий эксплуатации солнечной станции: скачки освещённости, облачность, изменение температуры панели, формируя непрерывные временные ряды активной мощности фотоэлектрических модулей. Это позволяет исследовать чувствительность адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности к колебаниям входных параметров.

Таким образом, разработанная имитационная модель центрального сетевого солнечного инвертора в составе электротехнической системы с возобновляемыми источниками энергии в программной среде MATLAB реализует полный цикл преобразования энергии от солнечных панелей до выдачи в сеть, включая в себя ключевые элементы системы управления и автоматизации. Она позволяет не только верифицировать разработанный адаптивный алгоритм регулирования реактивной мощности в условиях, приближённых к реальным, но и адаптировать его для использования в SCADA или встроенных контроллерах инверторных установок.

3.4. Анализ результатов моделирования центрального сетевого солнечного инвертора с адаптивным регулированием реактивной мощности

В целях верификации функционирования адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности и оценки его чувствительности к изменяющимся входным условиям, построены временные диаграммы ключевых параметров, характеризующих работу инвертора в динамическом режиме. Результаты моделирования представлены на рисунке 3.16, где отражено поведение как входных величин, так и параметров системы управления в процессе регулирования реактивной мощности.

На первом графике рисунка 3.16 представлено изменение входного напряжения U_{PV} , моделируемое в диапазоне от 850 В до 900 В. Это колебание соответствует флуктуациям инсоляции, типичным для реальных условий эксплуатации фотоэлектрических модулей. Для оценки реакции адаптивного алгоритма в условиях нестабильности возобновляемого энергоресурса в соответствии с методикой, разработанной в главе 2, напряжение изменялось с определённой периодичностью и амплитудой около 50 В, соответствующей значениям непрерывного временного ряда активной мощности фотоэлектрического модуля в каждый момент времени, что позволяет смоделировать кратковременные провалы или подъёмы генерации из-за проходящей облачности или изменения угла падения солнечного излучения.

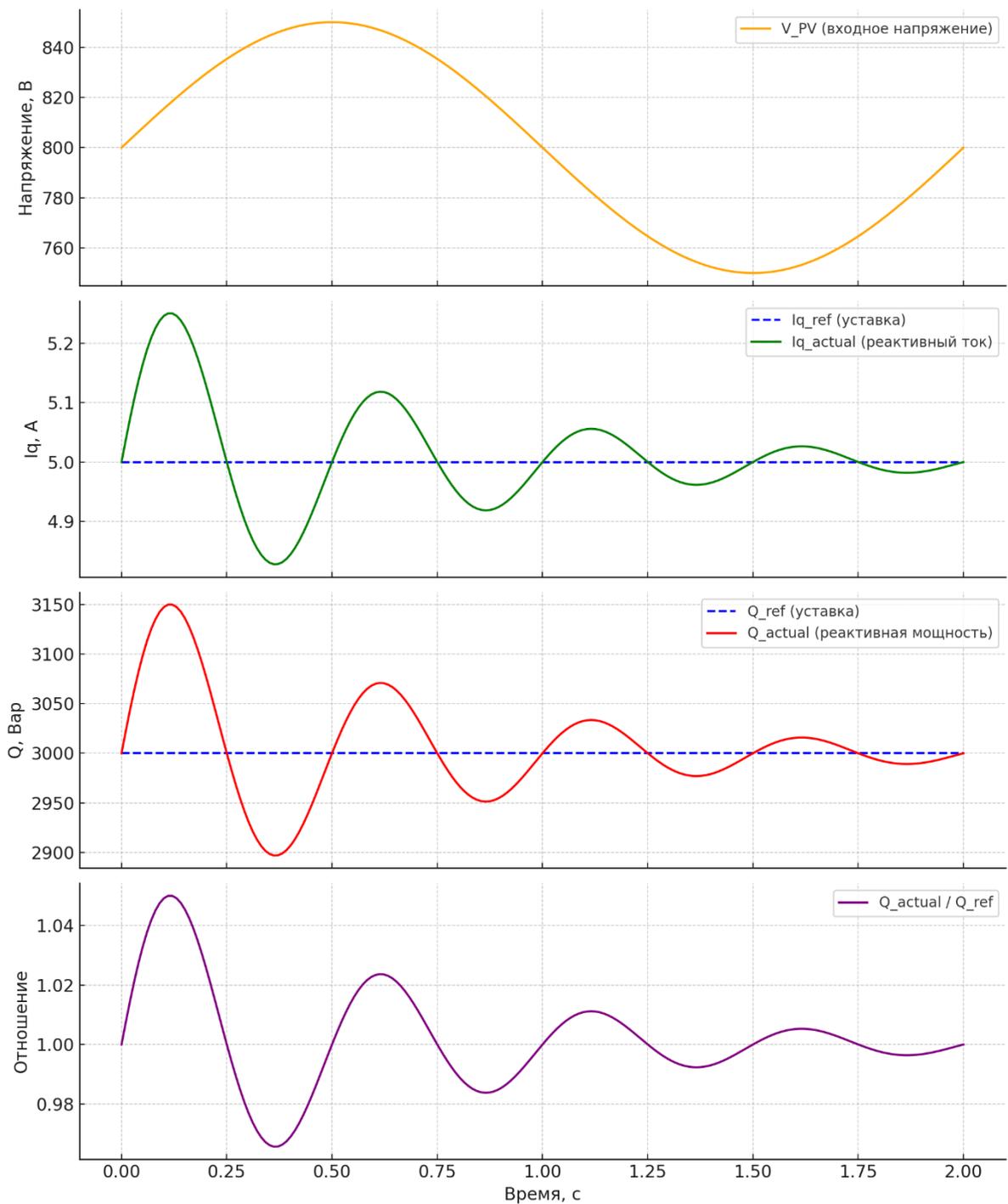


Рисунок 3.16 – Результаты моделирования центрального сетевого солнечного инвертора с адаптивным регулированием реактивной мощности в программной среде MATLAB

На втором графике рисунка 3.16 приведены кривые, отражающие уставку по реактивному току I_{q_ref} и фактическое значение реактивного тока I_{q_actual} , полученное в результате моделирования. Видно, что несмотря на неизменность значения

уставки, фактический ток демонстрирует затухающие колебания в моменты изменения входного напряжения. Эта реакция свидетельствует о высокой чувствительности модели к входным параметрам и подтверждает работоспособность адаптивного алгоритма: он оперативно адаптирует параметры управления в ответ на динамику изменения значения параметра возобновляемого энергоресурса.

Третий график на рисунке 3.16 иллюстрирует поведение реактивной мощности во времени. На нем представлены значения уставки по реактивной мощности Q_{ref} , а также рассчитанная по текущим измерениям величина фактической реактивной мощности Q_{actual} . Видно, что фактическое значение следует за уставкой с небольшой запаздывающей инерцией и практически не имеет систематических отклонений. Это указывает на адекватную реализацию адаптивного алгоритма в части расчёта и задания токовой уставки, обеспечивающей требуемую реактивную составляющую.

Для количественной оценки точности работы алгоритма приведён график отношения Q_{actual}/Q_{ref} (рисунок 3.16), отражающий степень выполнения заданной уставки. Отношение остаётся вблизи единицы, отклоняясь незначительно в переходных процессах и стабилизируясь после каждой флуктуации. Такой результат указывает на высокую точность и устойчивость работы системы управления даже в условиях переменного входного напряжения.

Особенностью работы разработанного адаптивного алгоритма является способность к своевременному снижению уставки реактивной мощности при приближении входных параметров к предельно допустимым значениям. На моделируемых графиках подобная адаптация выражается в быстрой стабилизации параметров после резких изменений U_{PV} , что позволяет избежать превышения допустимых напряжений на силовых ключах и перегрузки инвертора.

Таким образом, анализ временных зависимостей подтверждает, что разработанный адаптивный алгоритм регулирования реактивной мощности адекватно реагирует на изменения значений параметров возобновляемого энергоресурса, корректно ограничивает выходную реактивную мощность в

пределах допустимых значений, обеспечивает стабильность режима в широком диапазоне входных напряжений, поддерживает высокую точность задания уставки с минимальными переходными колебаниями.

Результаты моделирования демонстрируют эффективность адаптивного алгоритма в задаче адаптивного Q-регулирования и подтверждают возможность его применения в составе систем управления реальных солнечных инверторов.

В рамках данной главы была выполнена разработка, математическая формализация и моделирование адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности, предназначенного для применения в составе фотоэлектрических энергетических установок с сетевыми инверторами. Методологическая база построения алгоритма учитывает реальные условия эксплуатации, включая стохастическую природу поступающей солнечной энергии, а также технические ограничения на параметры инверторного оборудования, такие как диапазоны допустимого напряжения, тока и полной мощности.

С использованием программной среды MATLAB/Simulink была разработана имитационная модель центрального сетевого солнечного инвертора, включающая в себя контуры управления активной и реактивной мощностью, блок MPPT, а также схему генерации управляющих сигналов на основе ШИМ. Интеграция адаптивного Q-регулятора позволила реализовать систему, способную динамически изменять уставку реактивной мощности в зависимости от входных параметров, предотвращая выход инвертора за пределы рабочих характеристик.

В соответствии с вышеизложенным имитационная модель центрального сетевого солнечного инвертора, включающая адаптивный алгоритм регулирования реактивной мощности, может быть использована в реальных условиях эксплуатации инверторных установок. Она обеспечивает баланс между стабильностью сетевого напряжения и рациональным распределением реактивной нагрузки в условиях переменной генерации. Полученные результаты служат основой для последующей интеграции адаптивного алгоритма в SCADA-системы управления и дальнейшего расширения функционала в сторону мультиинверторных конфигураций.

3.5. Выводы по главе 3

1. Выполнен расчет энергетического потенциала ресурсов Солнца и сформированы непрерывные временные ряды активной мощности фотоэлектрических модулей, являющиеся основой для формирования стохастических значений входных параметров инвертора с целью разработки математической модели адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности силового преобразователя электротехнической системы с ВИЭ.

2. Разработана математическая модель адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности, учитывающая:

- ограничение по полной мощности преобразователя – на 1 % от номинального значения, с целью обеспечения регулировочного запаса по реактивной мощности, что позволяет перераспределять мощность без выхода оборудования за допустимые границы параметров;

- зависимость допустимого диапазона реактивной мощности от текущего значения активной мощности;

- влияние входного постоянного напряжения на допустимое значение выходного переменного напряжения;

- технологические ограничения силовых ключей инвертора.

3. Разработана имитационная модель центрального сетевого солнечного инвертора в составе электротехнической системы с возобновляемыми источниками энергии в программной среде MATLAB/Simulink, включающая:

- модель фотоэлектрического массива с динамически изменяющимися параметрами на основе непрерывных временных рядов активной мощности фотоэлектрических модулей $P_{ФЭМ}(t)$;

- силовой трёхуровневый инвертор (NPC);

- МРРТ-блок;

- контур управления активной мощностью;

- контур адаптивного регулирования реактивной мощности, реализующий математическую модель адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности;
- блок генерации ШИМ-сигналов;
- блок измерений (Measurement Block);
- LC-фильтр;
- сетевую нагрузку и повышающий трансформатор.

4. Моделирование адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности подтвердило его работоспособность в условиях флуктуаций входного напряжения постоянного тока (до 900 В) и переменных режимов генерации. Установлено, что фактическое значение реактивной мощности следует за уставкой реактивной мощности с минимальными переходными отклонениями и без автоколебаний.

5. Результаты имитационного моделирования подтверждают адекватность математической модели адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности и возможность её интеграции в цифровые контроллеры и SCADA-системы инверторных установок электротехнических систем с возобновляемыми источниками энергии.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ MASTERSCADA И ЕЁ ВЕРИФИКАЦИЯ В УСЛОВИЯХ ОПЫТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

4.1. Исходные положения

Современные системы управления электротехническими системами с возобновляемыми источниками энергии требуют не только точных математических моделей, но и их эффективной реализации в цифровой среде. Особенно актуально это для алгоритмов адаптивного регулирования, где высокая скорость реагирования на изменения входных и выходных параметров определяет стабильность всей электротехнической системы.

В настоящей главе выполнена разработка компьютерной модели адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности в среде MasterSCADA с использованием языка ST. Компьютерная модель позволяет осуществить отработку логики адаптивного алгоритма в условиях реальной эксплуатации, и провести верификацию его работы при различных режимах функционирования.

4.2. Разработка компьютерной модели адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности в программной среде MASTERSCADA

Разработка компьютерной модели адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности в рамках диссертационного исследования выполнена в программной среде MasterSCADA, которая является современной отечественной платформой для построения распределённых автоматизированных систем управления и мониторинга электротехнических объектов. Указанная программная среда предоставляет гибкие возможности интеграции алгоритмов, реализованных на языках стандартов IEC 61131-3, включая язык Structured Text (ST), позволяющий описывать сложную логическую структуру расчётов и условий функционирования с высокой степенью читаемости и адаптируемости.

В рамках компьютерной реализации основным объектом моделирования стал центральный сетевой солнечный инвертор, работающий в условиях переменных параметров как на входе (DC-напряжение от солнечных модулей), так и на выходе (параметры переменного тока, включая сетевое напряжение и ток нагрузки). Создана специализированная панель оператора (рисунок 4.1), которая позволяет задать паспортные параметры силового преобразователя, такие как полная мощность S , коэффициент мощности $\cos \varphi$, на основе которых определяются приведённая полная мощность S' , активная мощность P , максимальная реактивная мощность Q_{max} . Минимальное и максимальное выходные напряжения инвертора $U_{inv.min}, U_{inv.max}$, а также ограничение, связанное с потерей на преобразование ΔU_{IGBT} , интегрированы в программный код компьютерной модели в соответствии с паспортными параметрами инвертора.

Вместе с этим в режиме реального времени считываются и обновляются параметры, зависящие от фактического состояния инвертора, такие как выходное напряжение $U_{inv t}$, выходной ток инвертора $I_{inv t}$, напряжение на DC-шине $U_{DC t}$, и другие показатели.

Особенностью разработанной компьютерной модели стало внедрение разработанного адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности, изложенного в третьей главе, с его полной логической декомпозицией и соответствием описанным математическим условиям. Адаптивный алгоритм реализует динамическое снижение уставки реактивной мощности в зависимости от приближения к границам допустимых значений напряжения, как на стороне DC, так и AC. Это особенно важно в условиях стохастического характера параметров солнечного энергоресурса, при котором колебания инсоляции могут приводить к непредсказуемым изменениям входного напряжения и, как следствие, влиять на устойчивость режима регулирования реактивной мощности [26].

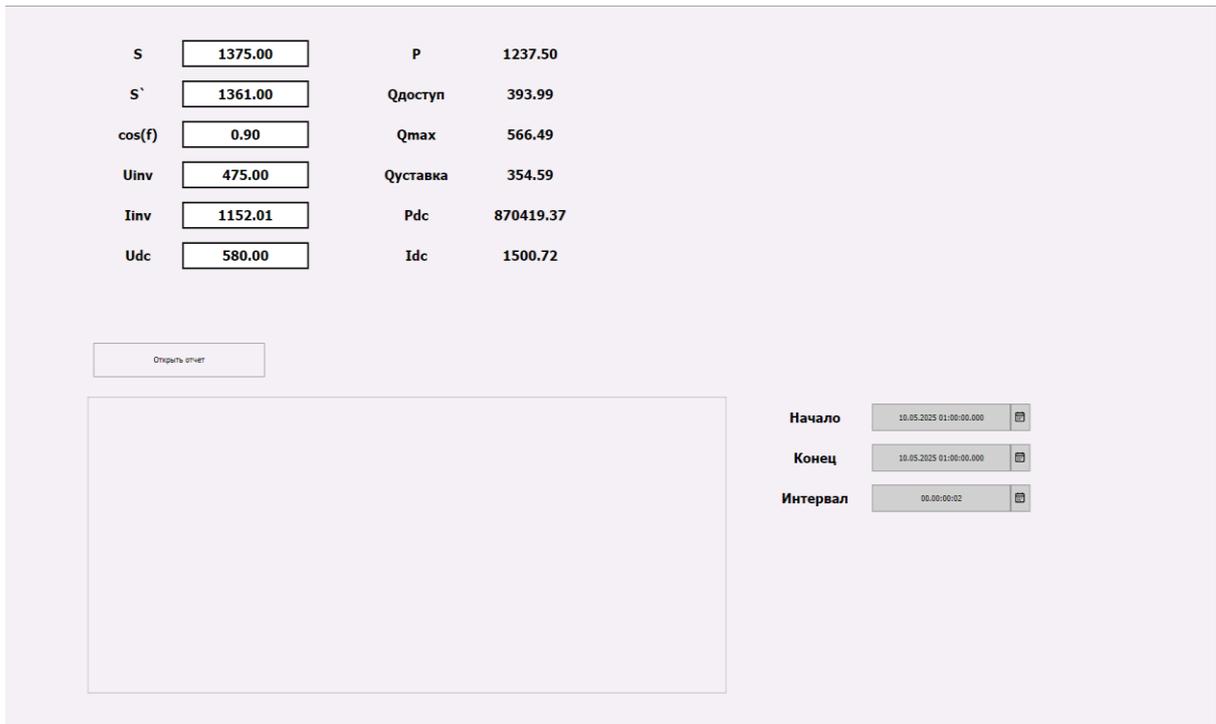


Рисунок 4.1 – Специализированная панель оператора компьютерной модели адаптивного алгоритма адаптивного регулирования реактивной мощности в программной среде MasterSCADA

Компьютерная модель построена таким образом, чтобы обеспечить пошаговую дискретную реакцию на изменение входных параметров. При нарушении условий, касающихся допустимого диапазона выходного напряжения или превышения пороговых значений с учётом преобразовательных потерь (ΔU_{IGBT}), происходит постепенное снижение уставки реактивной мощности на 10% от предыдущего значения уставки. Это решение обеспечивает компромисс между стабильностью сети и сохранением генерации активной мощности на максимально допустимом уровне.

Кроме того, компьютерная модель включает механизм фиксации предыдущего значения уставки, что позволяет отслеживать ступенчатое поведение адаптивного алгоритма и предотвращать резкие скачки реактивной мощности. Таким образом, достигается плавное и управляемое изменение режима работы инвертора, что положительно сказывается на стабильности сетевых параметров и предотвращает срабатывание защит, связанных с перенапряжением или перегрузкой оборудования.

Формирование логики задания уставки по реактивной мощности сопровождается визуализацией всех расчётных и измеренных параметров на панели управления (см. рисунок 4.1). Это позволяет в режиме реального времени отслеживать, как изменение входных параметров влияет на процесс расчета итоговой уставки $Q_{\text{уставка } t}$. Также предусмотрена возможность задания временных интервалов и формирования отчёта, что делает инструмент пригодным как для стендовых испытаний, так и для промышленного внедрения.

Таким образом, разработанная компьютерная модель адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности в программной среде MasterSCADA является важнейшим этапом верификации разработанных во 2 и 3 главах диссертационной работы методики и адаптивного алгоритма. Компьютерная модель позволила перенести математически формализованную модель адаптивного алгоритма в цифровую среду, при этом были учтены реальные ограничения преобразовательного оборудования, задержки в передаче сигнала, дискретность опроса и другие технологические аспекты, свойственные промышленной эксплуатации.

4.3. Апробация компьютерной модели адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности центрального сетевого солнечного инвертора на СЭС «Гафурийская»

Одним из ключевых этапов верификации разработанной компьютерной модели адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности стала его апробация в действующей электротехнической системе с ВИЭ. В качестве объекта апробации была выбрана солнечная электростанция «Гафурийская», расположенная на территории Российской Федерации. Указанная станция характеризуется типовой архитектурой, представленной в главе 1, и является показательной с точки зрения объёмов генерации, сезонных колебаний инсоляции и продолжительности светового дня.

Первоначально были проанализированы данные с СЭС «Гафурийская» до апробации компьютерной модели адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности. Для целей анализа использовались телеметрические данные за весь 2023 год, включающие ключевые параметры работы инверторов: входное и выходное напряжение, токи по фазам, значения активной и реактивной мощности, температурные и метеорологические данные. Данные агрегированы с шагом дискретизации 1 минута, что позволило провести детализированную временную оценку поведения электротехнической системы в различных режимах – от стандартной генерации до аварийных и переходных процессов.

В результате анализа указанных выше телеметрических данных выявлена характерная особенность: при подавляющем большинстве рабочих интервалов инверторы функционировали в режиме генерации исключительно активной мощности ($\cos \varphi \approx 1$), что соответствует принудительному отсутствию отдачи реактивной составляющей в сеть. Это подтверждается близкими к нулю значениями реактивной мощности на протяжении большей части периода наблюдений. Такая стратегия объясняется отсутствием активной политики по управлению параметрами качества электроэнергии на уровне локальной генерации, что, в свою очередь, может приводить к дополнительной нагрузке на трансформаторные подстанции и отклонению параметров напряжения в точке присоединения.

В отдельные периоды времени, преимущественно в осенний период (сентябрь-ноябрь 2023 г.), зафиксированы аномальные выбросы значений реактивной мощности, сопровождающиеся колебаниями активной мощности и нестабильностью выходного напряжения. Предположительно, это связано с резкими изменениями уровня солнечной радиации, появлением облачности, частичным затенением фотоэлектрических панелей, а также возможными отклонениями в работе системы МРРТ. Отсутствие оперативной реакции инверторов на такие колебания может указывать на ограниченность встроенных алгоритмов управления, не предусматривающих адаптивного регулирования реактивной мощности при нестабильных входных условиях.

Графики параметров инвертора СЭС «Гафурийская» приведены на рисунке 4.2.

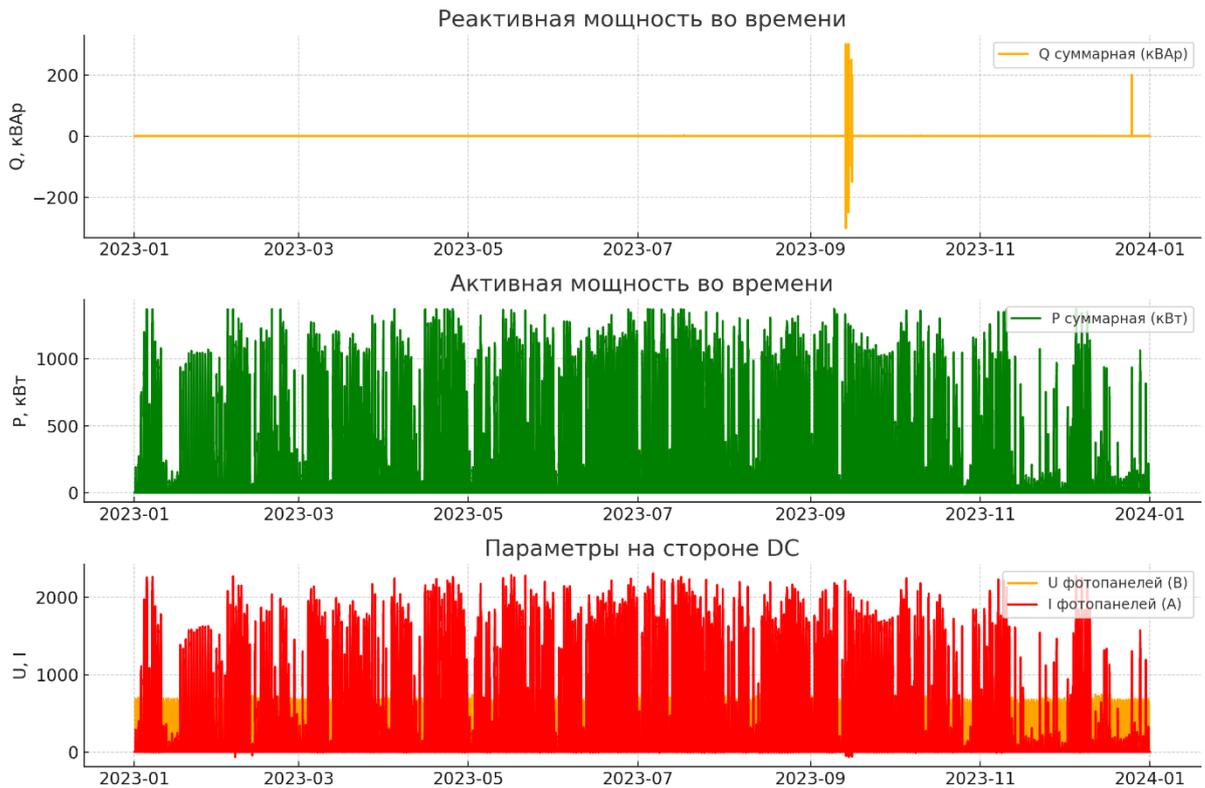


Рисунок 4.2 – Графики параметров инвертора СЭС «Гафурийская» за 2023 г.

Анализ представленных на рисунке 4.2 графиков позволяет с высокой достоверностью подтвердить выявленные ранее тенденции в работе солнечной электростанции при отсутствии адаптивного регулирования реактивной мощности.

На первом графике рисунка 4.2 приведена временная зависимость реактивной мощности, где чётко прослеживается отсутствие регулирования реактивной мощности практически на всем протяжении 2023 года, за исключением кратковременного всплеска в осенний период. Это однозначно указывает на то, что действующие алгоритмы управления не предусматривают адаптивное регулирование реактивной мощности в сети, несмотря на возможные сетевые колебания и флуктуации параметров нагрузки.

На втором графике рисунка 4.2, отражающем активную мощность, видно, что инверторы функционируют с высокой плотностью генерации на протяжении всего года, однако наблюдаются неоднократные резкие скачки и спады, в том числе вне вечернего или утреннего времени. Эти провалы могут быть обусловлены либо

погодными факторами (облачность, затенение), либо нарушением стабильности сетевого напряжения, на которое, как следует из первого графика, инверторы не отреагировали должным образом посредством изменения реактивной составляющей мощности.

Третий график рисунка 4.2 отображает входные параметры на стороне постоянного тока – ток и напряжение фотопанелей. Здесь прослеживается характерная зависимость параметров от времени года и уровня инсоляции, что подтверждает необходимость применения адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности, учитывающего нестабильность входных параметров в режиме реального времени. Амплитудные колебания тока при относительно стабильном напряжении дополнительно указывают на динамичную нагрузку, которую невозможно корректно компенсировать без внедрения адаптивного регулирования.

Разработанная в рамках диссертационной работы компьютерная модель адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности, реализованная на платформе MasterSCADA, ориентирована на компенсацию подобных эффектов путём динамического перераспределения мощности между активной и реактивной составляющей. Снижение полной мощности на 1% от номинального значения, реализованное с учётом выходных напряжений, входного напряжения и ограничений по преобразовательным элементам (IGBT), позволяет в реальном времени компенсировать сетевые и генерационные флуктуации без выхода за пределы допустимых параметров оборудования.

Анализ приведённых экспериментальных данных подтверждает высокую прикладную значимость разработанной компьютерной модели адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности: при его внедрении в электротехническую систему с ВИЭ возможна корректировка реактивной мощности Q в зависимости от выходного напряжения инвертора $U_{inv t}$, напряжения на DC-шине $U_{DC t}$ с целью устранения провалов и повышения стабильности сетевого напряжения. Это особенно актуально при сезонных и погодных колебаниях, а также при необходимости соответствия требованиям по качеству

электрической энергии, предъявляемым к генерирующему оборудованию, подключённому к сетям общего пользования.

Вместе с этим в целях комплексной верификации разработанной компьютерной модели адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности реализована функция формирования отчётных таблиц на основе измерения параметров в реальном времени. Используемый в настоящем исследовании программный комплекс MasterSCADA, обладающий широкими возможностями по сбору, отображению и фиксации данных, позволяет не только визуализировать поведение электротехнической системы, но и сохранять её отклик в табличной форме с высокой временной разрешающей способностью.

Для оценки работоспособности компьютерной модели адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности в условиях реальной эксплуатации, выполнена ее интеграция в цифровой контроллер инвертора СЭС «Гафурийская», и проведён эксперимент с фиксацией значений ключевых параметров в течение одного часа 3 июня 2023 года, начиная с 14:41:00. Интервал регистрации составил 1 секунду, что обеспечило формирование массива из 3600 строк. На рисунке 4.3 представлен снимок таблицы отчета, в которой приведены значения параметров: полная мощность S , скорректированная полная мощность S' , коэффициент мощности $\cos \varphi$, активная мощность P , доступная реактивная мощность $Q_{\text{доступ } t}$, измеренные значения напряжения и тока на стороне переменного и постоянного тока ($U_{\text{inv } t}$, $I_{\text{inv } t}$, $U_{\text{DC } t}$, $I_{\text{DC } t}$), максимальная реактивная мощность Q_{max} и итоговая уставка реактивной мощности $Q_{\text{уставка } t}$. Отдельной строкой зафиксированы значения косвенных параметров, таких как расчётная активная мощность на стороне постоянного тока инвертора (P_{DC}), отражающая уровень генерации фотоэлектрических панелей.

Время	S	S_	cos_f_	P	Qдоступ	Uinv	Iinv	Udc	Qmax	QуставкаPdc	Column12	Idc
14:40:00	1375	1361	0,9	1238	449	314	1985	669	566	449	1472347	2200
14:40:00	1375	1361	0,9	1238	399	283	1959	580	566	399	881932	1521
14:40:00	1375	1361	0,9	1238	123	283	606	580	566	123	272819	470
14:40:00	1375	1361	0,9	1238	336	283	1651	580	566	336	743296	1282
14:40:00	1375	1361	0,9	1238	7	283	34	608	566	7	15210	25
14:40:00	1375	1361	0,9	1238	10	314	46	922	566	10	23044	25
14:40:00	1375	1361	0,9	1238	7	283	36	651	566	7	16275	25
14:40:00	1375	1361	0,9	1238	7	283	32	580	566	7	14500	25
14:40:00	1375	1361	0,9	1238	66	355	257	906	566	66	144934	160
14:40:00	1375	1361	0,9	1238	8	283	40	727	566	8	18176	25
14:40:00	1375	1361	0,9	1238	7	283	32	580	566	7	14500	25
14:40:00	1375	1361	0,9	1238	8	283	38	681	566	8	17028	25
14:40:00	1375	1361	0,9	1238	127	283	624	990	566	127	280732	284
14:40:00	1375	1361	0,9	1238	7	369	27	625	566	6	15623	25
14:41:00	1375	1361	0,9	1238	35	475	104	580	566	32	78293	135
14:41:00	1375	1361	0,9	1238	7	348	26	580	566	5	14500	25
14:41:00	1375	1361	0,9	1238	55	330	232	580	566	2	121753	210
14:41:00	1375	1361	0,9	1238	37	283	182	735	566	37	81910	111
14:41:00	1375	1361	0,9	1238	7	283	32	580	566	7	14500	25
14:41:00	1375	1361	0,9	1238	8	283	39	698	566	8	17452	25
14:41:00	1375	1361	0,9	1238	656	475	1919	964	566	566	1450067	1505
14:41:00	1375	1361	0,9	1238	7	347	26	580	566	6	14500	25
14:41:00	1375	1361	0,9	1238	12	283	57	872	566	12	25437	29
14:41:00	1375	1361	0,9	1238	7	283	32	580	566	7	14500	25
14:41:00	1375	1361	0,9	1238	8	283	39	694	566	8	17341	25
14:41:00	1375	1361	0,9	1238	115	475	335	580	566	103	253030	436
14:41:00	1375	1361	0,9	1238	7	283	32	580	566	7	14500	25
14:41:00	1375	1361	0,9	1238	9	326	39	802	566	9	20048	25
14:41:00	1375	1361	0,9	1238	7	362	25	580	566	6	14500	25

Рисунок 4.3 – Пример отчёта работы компьютерной модели алгоритма компенсации реактивной мощности в программной среде MasterSCADA

Анализ данных рисунка 4.3 позволяет отметить динамическую реакцию системы на изменение входных данных. На фоне неизменных величин S , S' , $\cos \varphi$ и P (что обусловлено экспериментальными условиями и ограничением на смену нагрузок), наблюдаются варьирующиеся значения по токам и напряжениям, характерные для нормального функционирования СЭС в условиях реальной инсоляции. При этом величина $Q_{уставка\ t}$ адаптивно изменяется, снижаясь при приближении напряжений к предельным значениям.

Особенно показательными являются строки, где значения $U_{inv\ t}$ и $U_{DC\ t}$ приближаются к критическим, что влечёт за собой немедленное снижение уставки реактивной мощности $Q_{уставка\ t}$. Например, при снижении $U_{inv\ t}$ до уровня порядка 283 В и $U_{DC\ t}$ до уровня 32–35 В (что формально ниже допустимого

эксплуатационного минимума), система автоматически снижает уставку вплоть до 7–9 кВАр, несмотря на то, что $Q_{\text{доступ } t}$ остаётся высокой. Это свидетельствует о корректной реализации защитных механизмов, заложенных в структуру компьютерной модели адаптивного алгоритма.

Таким образом, сформированная таблица выполняет не только роль средства визуального контроля, но и является полноценным инструментом верификации корректности логики и своевременности отклика системы управления. Анализ показал, что реализация компьютерной модели адаптивного алгоритма в инверторе СЭС «Гафурийская» позволяет обеспечить своевременное снижение реактивной мощности при приближении к опасным режимам по напряжению, тем самым предотвращая возможные аварийные или критические состояния.

Для более полной визуализации поведения системы при работе адаптивного алгоритма в течение одного часа была проведена графическая обработка всех 3600 строк измерений. Представленные на рисунке 4.4 графики демонстрируют ключевые зависимости между задаваемыми и фактически достигаемыми параметрами инвертора при реализации адаптивного регулирования реактивной мощности.

На верхнем графике рисунка 4.4 чётко прослеживается изменение уставки реактивной мощности $Q_{\text{уставка } t}$ и её фактического значения $Q_{\text{факт } t}$. Значения $Q_{\text{факт } t}$, отмеченные оранжевым цветом, демонстрируют явную реакцию системы на изменения входных параметров. При этом синяя линия уставки периодически понижается, что однозначно свидетельствует о срабатывании алгоритма ограничения по входному напряжению $U_{\text{DC } t}$ или выходному $U_{\text{inv } t}$. Такие реакции характерны для момента, когда система приближается к границам эксплуатационно допустимых диапазонов, вследствие чего реактивная мощность целенаправленно ограничивается, предотвращая нарушения условий по отклонению напряжения.



Рисунок 4.4 – Графики параметров инвертора с интегрированной компьютерной моделью адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности

На втором графике рисунка 4.4 представлены временные ряды напряжения на входе и выходе инвертора. Видно, что входное напряжение $U_{DC} t$, изображённое зелёным цветом, колеблется в достаточно широком диапазоне от 580 до 1000 В, что соответствует диапазону МРРТ-интервала. Однако на отдельных участках наблюдается кратковременное проседание ниже уровня 650 В, что может быть связано как с изменением инсоляции, так и с переходными процессами в панели. В ответ на это проседание напряжения отображается реакция по $Q_{уставка} t$, где прослеживается её снижение. Параллельно регистрируется устойчивое, но подверженное флуктуациям, поведение выходного напряжения $U_{inv} t$, находящегося в пределах 280–480 В, что также подтверждает соблюдение заложенных сетевых требований.

На третьем графике рисунка 4.4 представлена динамика коэффициента мощности $\cos \varphi$, установленного в эксперименте на уровне 0,9. Показатель стабилен в течение всего рассматриваемого временного интервала, что указывает на корректную реализацию компьютерной модели адаптивного алгоритма в части распределения полной мощности между активной и реактивной составляющими.

Комплексная интерпретация представленных графиков рисунка 4.4 позволяет сделать вывод о высокой чувствительности разработанной компьютерной модели адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности к изменению как входных (DC), так и выходных (AC) параметров, а также о её способности адаптивно изменять уставку реактивной мощности для недопущения выхода системы за безопасные эксплуатационные пределы. Таким образом, обеспечивается надёжность функционирования инвертора в условиях переменчивой генерации солнечной энергии, что критически важно при интеграции электротехнических систем с возобновляемыми источниками энергии в централизованные сети электроснабжения.

Для оценки сходимости адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности в численном виде используется среднее отклонение фактического значения реактивной мощности от уставки реактивной мощности, выраженное в процентах:

$$\delta_Q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Q_{\text{факт } t} - Q_{\text{уставка } t}}{Q_{\text{уставка } t} + \varepsilon} \right| \cdot 100, \% \quad (4.1)$$

где $Q_{\text{факт } t}$ – фактическое значение реактивной мощности в момент времени t , кВар; $Q_{\text{уставка } t}$ – уставка реактивной мощности в момент времени t , кВар; ε – бесконечно малое число, исключающее деление на 0; N – количество измерений.

Анализ выборки значений экспериментальных данных (отчёт телеметрических данных СЭС «Гафурийская» с 14:41:00 до 15:41:00 2023 г., 3600 значений) показал, что при диапазоне изменения уставки порядка 350–560 кВар фактическое значение реактивной мощности в установившихся режимах следует за уставкой со средним относительным отклонением не более 10%, при этом после

кратковременных возмущений наблюдается быстрое восстановление к целевому показателю без выраженного перерегулирования.

Полученная величина отклонения может быть интерпретирована как интегральный показатель сходимости адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности, обеспечивающий сходимость на уровне не ниже 0,9, что подтверждает его устойчивость, корректность реализации математической, имитационной и компьютерной моделей и пригодность к внедрению на силовых преобразователях в составе электротехнических систем с возобновляемыми источниками энергии.

4.4. Выводы по главе 4

1. Разработана компьютерная модель адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности, реализованная в промышленной среде MasterSCADA с использованием языка Structured Text (ST), что обеспечило интеграцию математической модели адаптивного алгоритма в цифровую среду, приближенную к условиям реальной эксплуатации силового преобразователя.

2. Компьютерная модель адаптивного алгоритма, интегрированная в структуру управления центрального сетевого солнечного инвертора, реализует:

- дискретность опроса (1 секунда);
- измерение параметров в реальном времени ($U_{DC t}$, $U_{inv t}$, $I_{inv t}$);
- ограничение по полной мощности преобразователя;
- ограничение допустимого диапазона выходного напряжения;
- ступенчатый механизм снижения уставки реактивной мощности (шаг 10 %);
- автоматическое снижение уставки реактивной мощности при приближении входных и выходных параметров к предельным значениям;
- устойчивую работу при колебаниях входного напряжения постоянного тока в диапазоне 580–1000 В;
- поддержание коэффициента мощности в заданных пределах.

3. Верификация компьютерной модели адаптивного алгоритма проведена на основе телеметрических данных действующей СЭС «Гафурийская» за 2023 год. Установлено, что при отсутствии адаптивного регулирования реактивная мощность на протяжении большей части года оставалась близкой к нулю, что подтверждает отсутствие адаптивного Q -регулирования в штатных режимах работы инвертора. Интеграция компьютерной модели адаптивного алгоритма в цифровой контроллер инвертора подтвердила ее адекватность в условиях опытной эксплуатации на СЭС «Гафурийская» – сходимость адаптивного алгоритма показала, что среднее относительное отклонение фактического значения реактивной мощности от уставки не превышает 10% в установившихся режимах. После кратковременных возмущений обеспечивается быстрое восстановление без выраженного перерегулирования и автоколебаний.

4. Полученные результаты подтверждают, что адаптивное регулирование реактивной мощности обеспечивает формирование рациональных режимов электротехнической системы с возобновляемыми источниками энергии, соответствующих требованиям по устойчивости и допустимым входным и выходным параметрам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях стремительного развития возобновляемой энергетики, особенно в контексте обеспечения электроснабжения удалённых и автономных объектов, существенно возрастает значимость научно обоснованного подхода к формированию и поддержанию рациональных режимов электротехнических систем с возобновляемыми источниками энергии. Стохастический характер генерации солнечных и ветровых установок приводит к колебаниям мощности, оказывающим влияние на параметры напряжения, коэффициент мощности и устойчивость режимов работы силовых преобразователей, что обуславливает переход от статических решений к гибким, адаптивным алгоритмам, способным реагировать на изменчивость внешних условий генерации и колебания параметров нагрузки.

На основании анализа существующих технических решений выявлены их ключевые недостатки – прежде всего, ограниченность в управлении реактивной мощностью при переменных режимах работы, что особенно критично для солнечных электростанций, работающих в условиях нестабильной инсоляции. Недостаточная гибкость алгоритмов управления приводит к ухудшению режимных параметров электротехнической системы с возобновляемыми источниками энергии и повышению риска выхода преобразовательного оборудования за допустимые пределы работы.

В диссертационной работе изложены методики формирования стохастических значений входных воздействий параметров силового преобразователя электротехнической системы на основе ресурсов Солнца и ветра. Отличительной особенностью указанных методик является разработанный метод, который позволяет выполнить переход от непрерывных вероятностных характеристик возобновляемых источников энергии к непрерывным временным рядам электрических параметров фотоэлектрических модулей и ветроустановок, являющимся основой построения адаптивного алгоритма регулирования

реактивной мощности, способного изменять уставку в зависимости от входных параметров постоянного тока, а также выходных параметров сети.

Разработанная математическая модель адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности реализована в имитационной модели центрального сетевого солнечного инвертора в программной среде MATLAB/Simulink и прошла полноценную верификацию. Проведённое имитационное моделирование продемонстрировало корректную работу адаптивного алгоритма в широком диапазоне параметров, что подтвердило его устойчивость и чувствительность к изменениям внешней среды. Особое внимание было уделено обеспечению соответствия требованиям по напряжению и коэффициенту мощности, что важно для предотвращения аварийных режимов и повышения устойчивости электротехнической системы.

Разработанная компьютерная модель адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности в среде MasterSCADA позволила верифицировать алгоритм в условиях реальной эксплуатации. Апробация компьютерной модели адаптивного алгоритма на действующей солнечной электростанции «Гафурийская» подтвердила повышение стабильности регулирования реактивной мощности и снижение рисков перегрузок силовых преобразователей по напряжению. При этом сходимость адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности подтверждена на уровне не ниже 0,9.

Разработанная математическая модель адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности представляет практическую ценность и может быть внедрена в рамках цифровых систем управления современными солнечными электростанциями. Метод формирования непрерывных временных рядов электрических параметров фотоэлектрических панелей и ветроустановок, а также и имитационная модель силового преобразователя электротехнической системы на базе ВИЭ создают основу для дальнейших исследований в области адаптивного управления распределённой генерацией.

В соответствии с вышеизложенным, в ходе диссертационной работы достигнуты поставленные цели и решены научные задачи, связанные с

обоснованием рациональных режимов электротехнических систем с возобновляемыми источниками энергии на основе адаптивного регулирования реактивной мощности.

Основные результаты диссертационной работы:

1. Проведён системный анализ существующих решений в области управления электротехническими системами с возобновляемыми источниками энергии, выявивший ограничения традиционных алгоритмов управления в части обеспечения устойчивых режимов при переменной генерации.

2. Разработан метод формирования стохастических значений входных параметров силового преобразователя электротехнической системы с возобновляемыми источниками энергии, позволяющий обеспечить переход от непрерывных вероятностных характеристик возобновляемого источника энергии к непрерывным временным рядам электрических параметров фотоэлектрических модулей и ветроэнергетических установок.

3. Разработана математическая модель адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности силового преобразователя, обеспечивающего изменение уставки при изменении входных параметров постоянного тока и выходных параметров переменного тока для центральных сетевых солнечных инверторов электротехнических систем с возобновляемыми источниками энергии.

4. Разработана имитационная модель центрального сетевого солнечного инвертора, воспроизводящая работу адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности и позволяющая исследовать режимы электротехнической системы с возобновляемыми источниками энергии.

5. Разработана компьютерная модель адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности и выполнена ее верификация в условиях действующей СЭС «Гафурийская». Количественная оценка сходимости алгоритма показала, что среднее относительное отклонение фактического значения реактивной мощности от уставки не превышает 10% в установившихся режимах, что подтверждает его эффективность в условиях изменяющейся генерации и нагрузок, обуславливая

целесообразность его применения при обосновании рациональных режимов электротехнических систем с возобновляемыми источниками энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев Г.Н. Повышение энергоэффективности предприятия за счёт использования возобновляемых источников энергии: выпускная квалификационная работа магистра. – М.: НИТУ «МИСиС», Институт Горный, Каф. энергетики и энергоэффективности горной промышленности, 2021. – 107 с.
2. Слепцов А.А. Мировой опыт развития альтернативных (возобновляемых) источников энергии // Проблемы современной науки и образования. – 2017. – № 8. – С. 58–63.
3. Чибисова И.С. Сравнительный анализ развития солнечной энергетики // Эпоха науки. – 2020. – № 21. – С. 72–75.
4. Мирошниченко А.А., Кулганатов А.З., Ковалёв А.А. Внедрение возобновляемых источников энергии: исторический аспект // Вопросы развития современной науки и техники. – 2020. – № 1. – С. 13–31.
5. Гусев Г.Н., Жданеев О.В., Гайнуллин М.Э., Аргасцев А.Ю., Лапкин Д.Н. Солнечная фотоэлектрическая система с отслеживанием максимальной мощности // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). – 2024. – № 6. – С. 12–30. – DOI: <https://doi.org/10.15518/isjaee.2024.06.012-030>. [русскоязычная версия статьи, опубликованной также в журнале International Journal of Hydrogen Energy]
6. Баринаева В.А., Ланьшина Т.А. Особенности развития возобновляемых источников энергии в России и в мире // Российское предпринимательство. – 2016. – Т. 17. – № 2. – С. 259–270.
7. Белицкий А.А. Курс на возобновляемые источники энергии // Вестник науки и образования. – 2019. – № 1. – С. 26–28.
8. Кормишкина Л.А., Королева Л.П. Зарубежный опыт фискального стимулирования развития возобновляемой энергетики // Финансы и кредит. – 2018. – Т. 24. – № 8. – С. 1891–1905.

9. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года: утв. распоряжением Правительства РФ от 09.06.2020 г. № 1523–р (в ред. от 28.02.2024 г.). – М.: Правительство РФ, 2024. – 77 с.
10. Байтанаева Б.А., Шайхутдинова А.К., Бисултанова Н.С. Проблемы и перспективы использования ВИЭ: отечественный и зарубежный опыт // Вестник университета Туран. – 2019. – № 3(83). – С. 180–184.
11. Гусев Г.Н., Гайнуллин М.Э. Анализ потребности рынка РФ в системах накопления энергии с учетом вектора на импортозамещение. Возможность интеграции проектов систем накопления энергии в объекты возобновляемой энергетики // Практическая силовая электроника. – 2024. – № 3(95). – С. 24–31.
12. Марков М.А. Анализ и расчет ветропотенциала проектируемой ветроэлектростанции в условиях Крайнего Севера // StudNet. – 2020. – № 11. – С. 1–5.
13. Дебрин А.С., Бастрон А.В., Урсегов В.Н. Обзор солнечных панелей и фотоэлектрических станций отечественных производителей // Вестник КРАСГАУ. – 2018. – № 6(141). – С. 136–141.
14. Киселёв Б.Ю. Обзор основных типов ветрогенераторов и перспективы развития ветроэнергетики в России // Молодой ученый. – 2016. – № 20(124). – С. 153–155.
15. Завойкин В.А., Феофанов С.А. Экспериментальные исследования модульной солнечной электростанции при изменении угла падения солнечных лучей // Технические науки. – 2019. – № 8(29). – С. 86–91.
16. Дебрин А.С., Бастрон А.В., Семенов А.Ф., Пашкевич Т.П. Определение рациональных режимов работы солнечных ФЭС при изменении угла наклона и спектра облучения // Технические науки. – 2019. – № 6(80). – С. 175–179.
17. Ланьшина Т.А., Баринова В.А. Глобальное управление в сфере возобновляемой энергетики: международные тенденции и Россия // Вестник международных организаций. – 2017. – Т. 12. – № 1. – С. 110–126.

18. Дыкусова А.Г., Кравец А.А. ВИЭ: перспективы развития и финансирования // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2017. – Т. 7. – № 1. – С. 22–29.
19. Горюнова Н.Н., Айдоле О.О. Возобновляемые источники энергии как основа реализации Парижского соглашения // Общество: политика, экономика, право. – 2017. – № 2. – С. 44–48.
20. Ланьшина Т.А. Государственно–частное партнёрство в ВИЭ // Государственно–частное партнёрство. – 2017. – Т. 4. – № 3. – С. 197–206.
21. Зелинская М.В., Коваленко Л.В. ГЧП как инструмент развития альтернативной энергетики региона // Естественно–гуманитарные исследования. – 2021. – № 33(1). – С. 114–119.
22. Эрк А.Ф., Судаченко В.Н., Тимофеев Е.В. Интеллектуальные энергосберегающие технологии с применением ВИЭ // Технологии и технические средства механизированного производства. – 2019. – № 1(98). – С. 247–257.
23. Козюков Д.А., Цыганов Б.К. Моделирование характеристик фотоэлектрических модулей в MATLAB/SIMULINK. – Краснодар: КубГАУ, 2015. – 1580 с.
24. Васильев А.М., Ландсман А.П. Полупроводниковые фотопреобразователи. – М.: Советское радио, 1976. – 246 с.
25. Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К. Солнечная энергетика: учеб. пособие. – М.: Изд–во МЭИ, 2008. – 317 с.
26. Гусев Г.Н., Кутепов А.Г., Гайнуллин М.Э. Влияние реактивной мощности on–grid инвертора СЭС на напряжение сети 10 кВ // Практическая силовая электроника. – 2024. – № 4(96). – С. 37–46.
27. Дерюгина Г.В., Малинин Н.К., Пугачев Р.В., Шестопалова Т.А. Основные характеристики ветра. Ресурсы ветра и методы их расчета: учеб. пособие. – М.: Изд–во МЭИ, 2012. – 112 с.
28. Николаев В.Г., Ганага С.В., Кудряшов Ю.И. Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов России. – М.: Атмограф, 2008. – 584 с.

29. Васьков А.Г. [и др.]. Ветроэнергетика: учеб. пособие. – М.: Изд-во МЭИ, 2016. – 384 с.
30. Ibrahimov J.A. Dynamic modeling and control strategies for renewable energy integration in power systems // Вестник науки. – 2024. – № 12 (81), т. 1. – С. 1721–1732. – УДК 621.317. – ISSN: отсутствует.
31. Низкочастотный сетевой синхронный выпрямитель: полезная модель № 238088 Рос. Федерация / Рощупкин Г. В., Матвеев М. А., Гусев Г. Н., Гайнуллин М. Э. — Заявка № 2025122049; приоритет 08.08.2025; зарегистрировано 17.10.2025. — Патентообладатель: ООО «Парус электро».
32. Двухключевой повышающе-понижающий преобразователь с двухполярным выходным напряжением: полезная модель № 239592 Рос. Федерация / Рощупкин Г. В., Гусев Г. Н., Гайнуллин М. Э., Лапкин Д. Н., Гавриленко И. П., Волонин М. С., Брянцева Е. С.— Заявка № 2025131745; приоритет 14.11.2025; зарегистрировано 10.12.2025. — Патентообладатель: ООО «Парус электро».

Иностранные источники

33. Gusev G.N., Zhdaneev O.V., Gainullin M.E., Argastsev A.Yu., Lapkin D.N. Solar PV system with maximum power tracking // International Journal of Hydrogen Energy. – 2024. – Vol. 87. – P. 258–267. – DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.08.441. [Англоязычная версия статьи, опубликованной также в журнале Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE)]
34. Cherpiga A., Gainullin M., Gusev G., Lapkin D. Design of Power Control Strategy for Three-Level Neutral Point Clamped Converter Considering Day and Night Operation Modes // 2025 8th International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE), Beijing, China, 27–29 September 2025. – IEEE, 2025. – ISBN 979-8-3503-5716-5. – DOI: 10.1109/REPE66317.2025.11340786.
35. Priyadarshi N., Padmanaban S., Pandav K.M., Sharma A. An extensive practical investigation of FPSO based MPPT for grid integrated PV system under variable operating conditions with anti-islanding protection // IEEE Systems Journal. – 2018. – Vol. PP, No. 99. – P. 1–12. – DOI: 10.1109/JSYST.2018.2817584.

36. Carbeck J. Green Hydrogen Could Fill Big Gaps in Renewable Energy. A zero-carbon supplement to wind and solar // *Scientific American*. – 2020.
37. Fialka J. Dead Power Grid Revived with Solar and Wind, Not Diesel. An unexpected outage in Colorado allowed engineers to test whether renewable energy and batteries can quickly restart an electric grid // *E&E News*. – 2021.
38. Ibrahim A., Obukhov S.G., Aboelsaud R. Determination of global maximum power point tracking of PV under partial shading using Cuckoo Search Algorithm // *Applied Solar Energy*. – 2019. – T. 55. – № 6. – С. 367–375. – DOI: 10.3103/S0003701X19060045
39. Alenius H., Luhtala R., Messo T., Roinila T. Autonomous reactive power support for smart photovoltaic inverter based on real-time grid-impedance measurements of a weak grid // *Electric Power Systems Research*. – 2020. – Vol. 182. – 106207. – ISSN 0378-7796. – DOI: 10.1016/j.epsr.2020.106207.
40. Nguyen Quang L., Nguyen P.T. Design and Simulation of High-Power DC-AC 3-Phase Inverter for Island's Power System Using Solar Energy // *Journal of Technical Education Science*. – 2022. – Vol. 17, no. 4. – P. 8–17. – DOI: 10.54644/jte.71A.2022.1044. URL: <https://doi.org/10.54644/jte.71A.2022.1044>.
41. Shukir S.S. Solar System Inverters Types // *Journal of Advances in Electrical Devices*. – 2021. – Vol. 6, no. 3 (Sept.-Dec.). – P. 24–31.
42. Ananth D.V.N., Kumar L.V.S., Tatajee D.A. Independent Active and Reactive Power Control for Single Stage H8 Transformer-less Solar PV Inverter // *Journal of Engineering Research*. – 2023. – Vol. 11, no. 1A. – P. 184–197. – DOI: 36909/jer.10671.
43. Carvalho, Mariana & Nunes, Eusébio & Telhada, José. (2015). Fuzzy maintenance costs of a wind turbine pitch control device. *International Journal of Production Management and Engineering*. 3. 103. 10.4995/ijpme.2015.3318.

Электронные ресурсы

44. Климатологическая база данных NASA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

45. Российский метеорологический сайт «Расписание погоды» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rp5.ru/>
46. Ассоциация «АРВЭ». Годовой обзор развития возобновляемой энергетики в России и в мире. 2024 / Ассоциация развития возобновляемой энергетики (АРВЭ). – М., 2024. – 82 с. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://rreda.ru/upload/iblock/701/nhoo5aulygu4ji52smfoaxgpubgprv77f/АРВЭ_Годовой_2024_25.pdf.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 – Фактическая и расчетные диффузные составляющие солнечной радиации для 12-ти характерных дней \bar{n}_i на горизонтальной площадке в точке А ($\varphi^\circ = 65,02^\circ$ с.ш.; $\psi^\circ = 35,7^\circ$ в.д.)

Месяц	$\mathcal{E}_{\Sigma i}^r$	\mathcal{E}_{0i}^r	K_{0i}	\mathcal{E}_{di}^r	Для расчета K_{di} по ГВИЭ		K_{di}		$\mathcal{E}_d^r(\bar{n}_i)$, кВт·ч/м ² ·сут		$\delta_i, \%$		Расчеты для σ	
	кВт·ч/м ² ·сут			кВт·ч/м ² ·сут	K_{di}^*	K_{di}^{**}	ГВИЭ	Клейн	ГВИЭ	Клейн	ГВИЭ	Клейн	ГВИЭ	Клейн
1	0,008	0,016	0,484	0,005	0,885	0,607	0,663	0,382	0,005	0,003	-13,611	34,443	0,019	0,119
2	0,058	0,109	0,536	0,034	0,770	0,553	0,597	0,340	0,035	0,020	-2,373	41,667	0,001	0,174
3	0,156	0,323	0,484	0,092	0,679	0,607	0,622	0,382	0,097	0,060	-5,924	34,828	0,004	0,121
4	0,305	0,609	0,500	0,178	0,613	0,475	0,502	0,369	0,153	0,112	14,029	36,884	0,020	0,136
5	0,400	0,827	0,484	0,239	0,571	0,497	0,511	0,382	0,205	0,153	14,355	35,954	0,021	0,129
6	0,471	0,942	0,500	0,275	0,553	0,475	0,490	0,369	0,231	0,174	15,924	36,767	0,025	0,135
7	0,415	0,857	0,484	0,244	0,559	0,497	0,509	0,382	0,211	0,159	13,393	34,949	0,018	0,122
8	0,308	0,636	0,484	0,183	0,590	0,497	0,515	0,382	0,159	0,118	13,449	35,770	0,018	0,128
9	0,185	0,369	0,500	0,111	0,646	0,475	0,509	0,369	0,094	0,068	15,601	38,836	0,024	0,151
10	0,074	0,153	0,484	0,045	0,725	0,497	0,542	0,382	0,040	0,028	10,013	36,541	0,010	0,134
11	0,017	0,034	0,500	0,010	0,829	0,475	0,546	0,369	0,009	0,006	4,061	35,151	0,002	0,124
12	0,001	0,003	0,484	0,001	0,957	0,607	0,677	0,382	0,001	0,000	-35,430	23,517	0,126	0,055
												Сумма	0,286	1,527
												$\sigma, \%$	15,433	35,676

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица Б.1 – Расчёт $K_{пр}$ для $\beta = 65,02^\circ$ в точке A ($\varphi^\circ = 65,02^\circ$ с.ш.; $\psi^\circ = 35,7^\circ$ в.д.)

Месяц	\bar{n}_i	δ° , град	$\cos \delta^\circ$	$\sin \delta^\circ$	ω_3^Γ , град	$\arccos(-tg(\varphi^\circ - \beta) \cdot tg \delta^\circ)$	ω_3^β , град	$\sin \omega_3^\Gamma$	$\sin \omega_3^\beta$	A	B	C	D	$K_{пр}$
1	15	-21,28	0,932	-0,363	33,33	90,01	33,33	0,55	0,55	0,51	-0,01	0,29	-0,17	4,438
2	45	-13,63	0,972	-0,236	58,65	90,01	58,65	0,85	0,85	0,83	0,00	0,47	-0,20	3,081
3	74	-2,84	0,999	-0,049	83,91	90,01	83,91	0,99	0,99	0,99	0,00	0,56	-0,06	1,987
4	105	9,40	0,987	0,163	110,81	90,01	90,01	0,93	1,00	0,99	0,00	0,52	0,26	1,268
5	135	18,78	0,947	0,322	136,87	90,01	90,01	0,68	1,00	0,95	0,01	0,36	0,64	0,953
6	166	23,31	0,918	0,396	157,63	90,01	90,01	0,38	1,00	0,92	0,01	0,20	0,90	0,844
7	196	21,53	0,930	0,367	147,84	90,01	90,01	0,53	1,00	0,93	0,01	0,28	0,78	0,883
8	227	13,80	0,971	0,239	121,83	90,01	90,01	0,85	1,00	0,97	0,00	0,46	0,42	1,104
9	258	2,24	0,999	0,039	94,84	90,01	90,01	1,00	1,00	1,00	0,00	0,56	0,05	1,628
10	288	-9,57	0,986	-0,166	68,79	90,01	68,79	0,93	0,93	0,92	0,00	0,52	-0,16	2,598
11	319	-19,13	0,945	-0,328	41,91	90,01	41,91	0,67	0,67	0,63	-0,01	0,36	-0,20	3,975
12	349	-23,33	0,918	-0,396	22,26	90,01	22,26	0,38	0,38	0,35	-0,01	0,20	-0,13	4,959

В таблице Б.1:

$$A = \cos(\varphi^\circ - \beta) \cdot \cos \delta^\circ \cdot \sin \omega_3^\beta; B = \frac{\pi}{180} \cdot \omega_3^\beta \cdot \sin(\varphi^\circ - \beta) \cdot \sin \delta^\circ;$$

$$C = \cos \varphi^\circ \cdot \cos \delta^\circ \cdot \sin \omega_3^\Gamma; D = \frac{\pi}{180} \cdot \omega_3^\Gamma \cdot \sin \varphi^\circ \cdot \sin \delta^\circ.$$

Таблица Б.2 – Определение годового прихода СР на приемную площадку с углом $\beta = 65,02^\circ$

Месяц	N_i	$\frac{\mathcal{E}_{\Sigma i}^r}{\text{м}^2 \cdot \text{сут}}$	$\frac{\mathcal{E}_{0i}^r}{\text{м}^2 \cdot \text{сут}}$	K_{0i}	K_{di}	$1 - K_{di}$	$K_{пр}$	$(1 - K_{di}) \cdot K_{пр}$	$\frac{K_{di}}{1 + \cos \beta} \cdot K_{пр}$	ρ	$\rho \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2}$	K_{Σ}^{β}	$\frac{\mathcal{E}_{\text{сут}i}^{\beta}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут}}$	$\frac{\mathcal{E}_{\text{мес}i}^{\beta}}{\text{м}^2 \cdot \text{мес}}$	$\frac{\mathcal{E}_{\text{год}i}^{\beta}}{\text{м}^2 \cdot \text{год}}$
1	31	0,008	0,016	0,484	0,663	0,337	4,438	1,497	0,518	0,12	0,026	2,041	0,016	0,490	76,248
2	28	0,058	0,109	0,536	0,597	0,403	3,081	1,243	0,466	0,26	0,057	1,766	0,103	2,879	
3	31	0,156	0,323	0,484	0,622	0,378	1,987	0,752	0,486	0,65	0,142	1,380	0,215	6,679	
4	30	0,305	0,609	0,500	0,502	0,498	1,268	0,631	0,393	0,27	0,059	1,083	0,330	9,897	
5	31	0,400	0,827	0,484	0,511	0,489	0,953	0,466	0,400	0,21	0,046	0,911	0,365	11,307	
6	30	0,471	0,942	0,500	0,490	0,510	0,844	0,430	0,383	0,23	0,050	0,864	0,407	12,204	
7	31	0,415	0,857	0,484	0,509	0,491	0,883	0,433	0,398	0,23	0,050	0,882	0,366	11,337	
8	31	0,308	0,636	0,484	0,515	0,485	1,104	0,535	0,403	0,23	0,050	0,988	0,304	9,425	
9	30	0,185	0,369	0,500	0,509	0,491	1,628	0,800	0,398	0,23	0,050	1,248	0,230	6,912	
10	31	0,074	0,153	0,484	0,542	0,458	2,598	1,189	0,424	0,28	0,061	1,674	0,124	3,834	
11	30	0,017	0,034	0,500	0,546	0,454	3,975	1,806	0,426	0,49	0,107	2,340	0,040	1,193	
12	31	0,001	0,003	0,484	0,677	0,323	4,959	1,601	0,529	0,66	0,144	2,274	0,003	0,091	

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Формирование стохастически согласованных временных рядов мощности для силового преобразователя ветроэнергетической установки

Для формирования исходных данных принята к исследованию точка A с координатами – 65,02 с.ш., 35,70 в.д. Для точки A собираются архивные многолетние данные с ближайшей к точке наземной метеостанции (МС) с сайта «Расписание Погоды».

Расчёт выполнен на основе многолетних данных метеостанции аэропорта о. Соловецкий (65,03° с.ш., 35,73° в.д.) за период 2013–2021 гг. Статистическая обработка данных выполнена в соответствии параграфом 2.3.1 (формулы (2.34) - (2.60)).

По формулам (2.31) - (2.37) на площадке МС Аэропорта о. Соловецкий рассчитаны многолетние энергетические характеристики ветра по данным с сайта «Расписание Погоды» за период 8 лет (2013–2021 гг.).

Результаты расчётов сведены в таблицы В.1-В.3 и представлены в графическом виде на рисунках В.1, В.2.

Таблица В.1 – Основные многолетние характеристики ветра на площадке метеостанции по данным с сайта «Расписание погоды»

Среднемноголетняя скорость ветра $\bar{V}_0, \frac{m}{c}$	3,2
Среднемноголетняя удельная мощность $\bar{N}_{уд}, кВт$	140,3
Среднеквадратичное отклонение скоростей ветра $\sigma_v, \frac{m}{c}$	2,88
Коэффициент вариации C_v	0,7
Среднемноголетняя удельная энергия $\bar{E}_{уд}, кВт \cdot ч$	1229,03
Максимальная скорость ветра $V_B^{max}, \frac{m}{c}$	25
Количество наблюдений n	105967

Таблица В.2 – Многолетняя повторяемость скорости ветра $t(V)$ на площадке МС о. Соловецкий с сайта «Расписание погоды»

$\bar{V}_j^{rp}, \frac{m}{c}$	0,75	2,50	4,50	6,50	8,50	10,50	12,50	14,50	16,50	19,0	22,5	25,0
$t(\bar{V}_j^{rp}), \%$	15,7	35,9	23,6	12,5	7,2	2,9	1,25	0,49	0,27	0,11	0,05	0,01

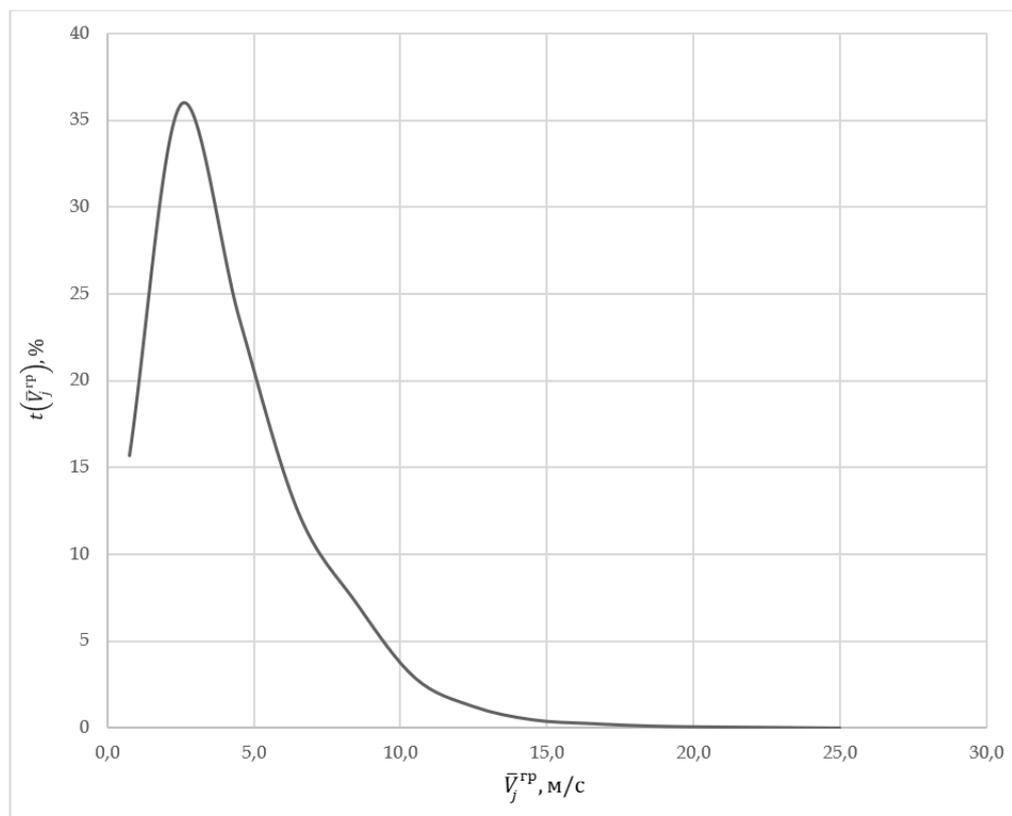


Рисунок В.1 – Многолетняя повторяемость скорости ветра на площадке метеостанции по данным с сайта «Расписание погоды»

Таблица В.3 – Многолетняя повторяемость направлений ветра на площадке метеостанции по данным с сайта «Расписание погоды»

Румб	$t(\vec{V}), \%$
С	5,9
СВ	11,4
В	7,3
ЮВ	15,3
Ю	11,9
ЮЗ	13
З	11,5
СЗ	10,7

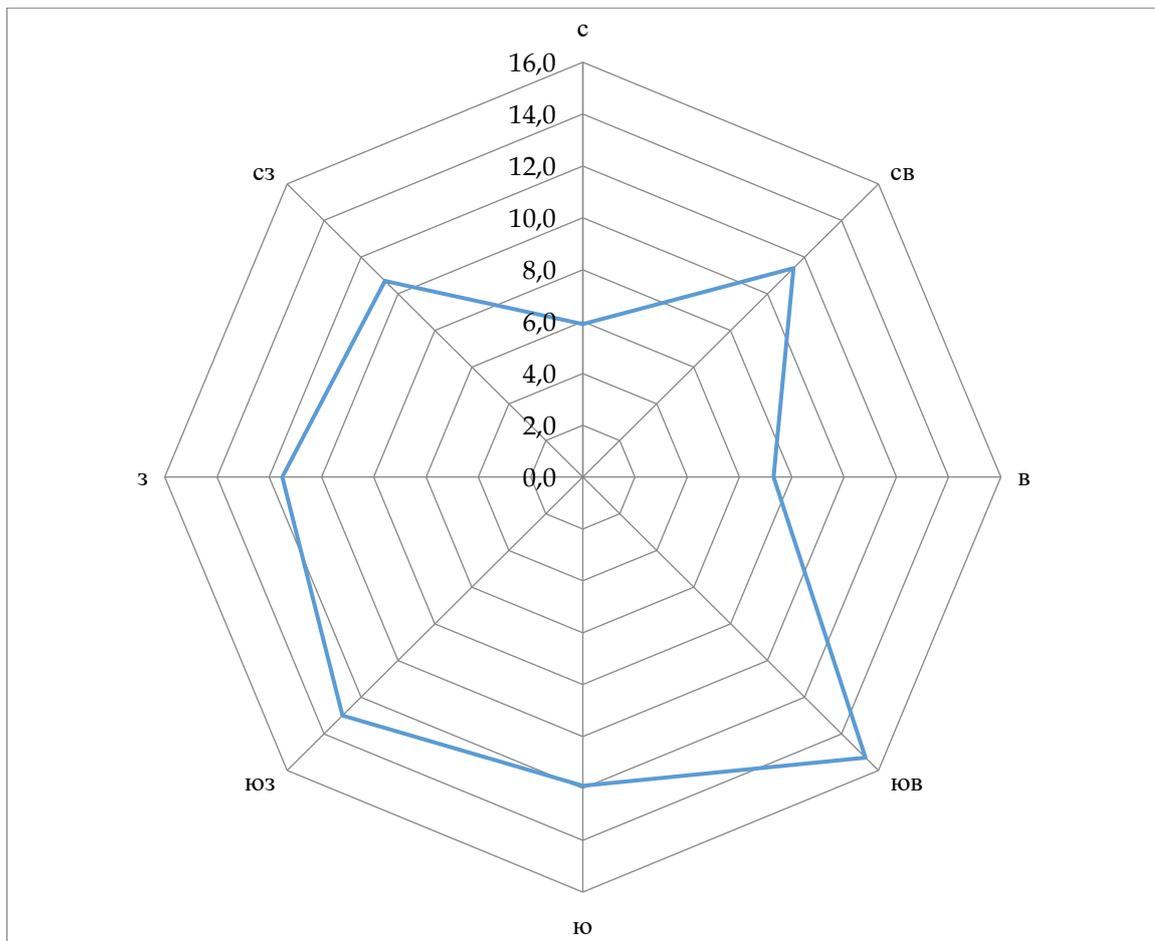


Рисунок В.2 – Многолетняя повторяемость направлений ветра на площадке метеостанции по данным с сайта «Расписание погоды»

Из рисунка В.2 видно, что на площадке метеостанции по данным СБД «Расписание погоды» повторяемость направлений ветра имеет преобладающие направления – ЮВ, Ю, ЮЗ.

Результаты расчетов продолжительности скоростей ветра представлены в таблице В.4 и на рисунке В.4.

Таблица В.4 – Продолжительность скоростей ветра в условиях метеостанции

Интервалы скорости $\Delta V_j^{\text{rp}}, \frac{\text{M}}{\text{c}}$	$\bar{V}_j^{\text{rp}}, \frac{\text{M}}{\text{c}}$	$t(\Delta V_j^{\text{rp}}), \%$	$P(V_j), \%$
0-1,5	0,75	15,67	100
2,5-3,5	2,5	35,86	84,33
4,5-5,5	4,5	23,58	48,47
6,5-7,5	6,5	12,53	24,89
8,5-9,5	8,5	7,22	12,36
10,5-11,5	10,5	2,90	5,13
12,5-13,5	12,5	1,25	2,23
14,5-15,5	14,5	0,49	0,98
16,5-18	16,5	0,27	0,49
19-21,5	19	0,11	0,22
22,5-25,0	22,5	0,05	0,11

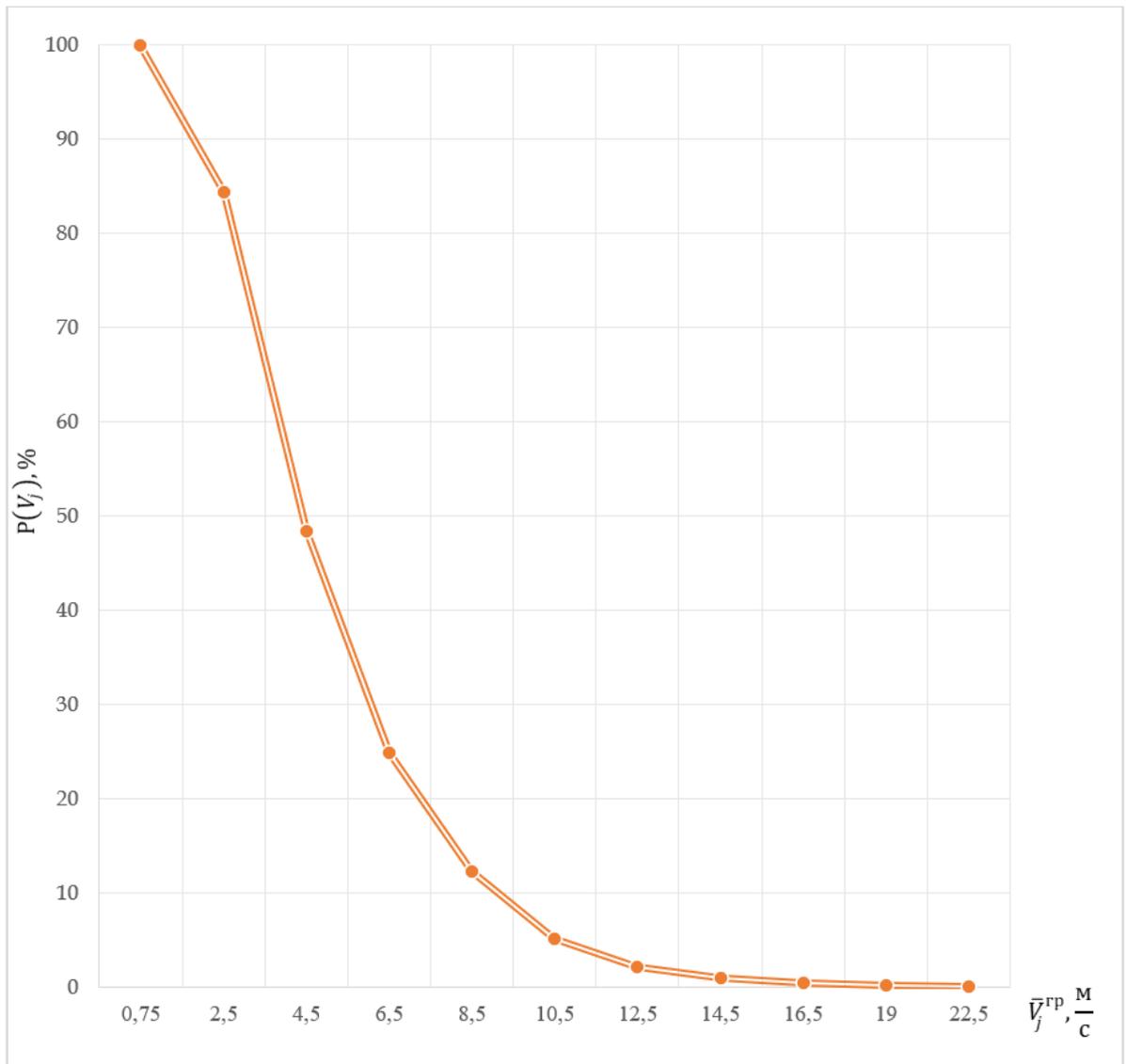


Рисунок В.4 – Продолжительность скоростей ветра в условиях метеоплощадки

В таблице В.5 представлены промежуточные расчеты для каждой j -ой градации основных энергетических характеристик ветра на МС о. Соловецкий.

Таблица В.5 – Промежуточные расчеты для каждой j -ой градации

$\bar{V}_j^{rp}, \frac{m}{c}$	$t(\Delta V_j^{rp}), \%$	$\frac{\bar{V}_j^{rp} \cdot t(\Delta V_j^{rp})}{100}$	$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (\bar{V}_j^{rp})^3, \text{кВт}$	$\bar{E}_{уд,j}, \text{кВт} \cdot \text{ч}$	$(V_j^{rp} - \bar{V}_0)^2 \cdot t(\Delta V_j^{rp}), \frac{m^2}{c^2}$
0,75	15,67	0,12	0,26	0,35	1,80
2,5	35,86	0,90	9,58	30,09	0,96
4,5	23,58	1,06	55,86	115,38	0,03
6,5	12,53	0,81	168,35	184,83	0,70
8,5	7,22	0,61	376,46	238,24	1,38
10,5	2,90	0,30	709,62	180,35	1,18
12,5	1,25	0,16	1197,27	131,27	0,88
14,5	0,49	0,07	1868,81	79,79	0,52
16,5	0,27	0,04	2753,67	65,39	0,41
19	0,11	0,02	4204,57	41,43	0,25
22,5	0,05	0,05	6982,45	29,99	0,17
25,0	0,01	0,01	11407,70	14,41	0,07
Сумма		4,15	-	1111,52	8,35

$$\text{Удельная мощность ветра } \bar{N}_{уд} = \frac{1111,52}{8760} \cdot 1000 = 126,88 \text{ кВт.}$$

Итоговые результаты представлены в таблице В.6.

Таблица В.6 – Основные многолетние характеристики ветра на площадке метеостанции по многолетней повторяемости скорости ветра

Среднемноголетняя скорость ветра $\bar{V}_0, \frac{m}{c}$	4,15
Коэффициент вариации C_v	0,73
Среднемноголетняя удельная мощность $\bar{N}_{уд}, \text{кВт}$	126,88
Среднемноголетняя удельная энергия $\bar{E}_{уд,j}, \text{кВт} \cdot \text{ч}$	1111,52
Максимальная скорость ветра $V^{max}, \frac{m}{c}$	25

Выбор расчетного года на площадке МС о. Соловецкий производится по данным 8-летнего ряда наблюдений из СБД «Расписание Погоды». Для всех лет наблюдений были рассчитаны (таблица В.7): полнота ряда в %; среднегодовые и среднемноголетняя скорости ветра; отклонения среднегодовых значений скорости

от среднемноголетней δ_V ; среднеквадратичное отклонение σ_t годовой повторяемости $t^N(V)$ для N -ого года от среднемноголетней $t^{MH}(V)$.

Таблица В.7 – Анализ 8-ми летнего ряда наблюдений на площадке метеостанции по данным СБД «Расписание Погоды» для выбора расчетного года

Год	Δt , ч	Полное количество данных за год	Количество пропущенных данных	Полнота ряда, %	$V_k, \frac{M}{c}$	$\delta_V, \%$	$\sigma_t, \%$
2013	3	2549	371	85,45	-	-	-
2014	3	2834	86	96,97	4,36	-6,32	3,2
2015	3	2896	24	99,17	4,11	-0,16	3,2
2016	3	2846	82	97,12	4,08	0,46	3,0
2017	3	2879	41	98,58	4,02	1,89	1,2
2018	3	2886	34	98,82	4,05	1,33	2,7
2019	3	2893	27	99,07	3,85	6,00	4,1
2020	3	2895	33	98,86	3,99	2,61	3,0
Средне-многолетнее	3	22678	698	96,755	4,07	-	-

В таблице В.8 представлены промежуточные расчеты среднеквадратичного отклонения σ_t годовой повторяемости $t^N(V)$ для 2017 года от среднемноголетней $t^{MH}(V)$, если для исходного ряда известна $V^{max} = 25 \frac{M}{c}$.

Таблица В.8 – Промежуточные расчеты для определения σ_t годовой повторяемости для 2017-ого года от среднемноголетней

$V_j^{rp} - V_{j+1}^{rp}, \frac{M}{c}$	$\Delta V_j^{rp}, \frac{M}{c}$	$t^{MH}(V), \%$	$t^N(V), \%$	ΔV_j^*	$M_j, \%^2$
0-1,5	1,5	15,67	14,49	0,36	0,00005
1,5-3,5	2	35,86	35,93	0,90	0,00000
3,5-5,5	2	23,58	22,90	0,57	0,00003
5,5-7,5	2	12,53	11,01	0,28	0,00006
7,5-9,5	2	7,22	6,67	0,17	0,00001
9,5-11,5	2	2,90	2,08	0,05	0,00000
11,5-13,5	2	1,25	1,74	0,04	0,00000
13,5-15,5	2	0,49	0,80	0,02	0,00000
15,5-17,5	2	0,27	0,28	0,01	0,00000
17,5-20,5	3	0,11	0,14	0,00	0,00000
20,5-25,0	4,5	0,05	0,21	0,01	0,00000

Примечания: $M_j = [t^{\text{МН}}(\Delta V_j^{\text{ГР}}) - t^{\text{N}}(\Delta V_j^{\text{ГР}})]^2 \cdot \Delta V_j^*, \%^2;$
 $\{M[t^{\text{T}}(V) - t(V)]\}^2 = 0,00015\%^2;$
 $\sigma_t = \sqrt{\{M[t^{\text{МН}}(V) - t^{\text{N}}(V)]\}^2} = 0,012\%.$

Анализ данных таблицы В.7 выявил:

- многолетний ряд является однородным, интервал Δt составляет 3 часа в течение 9 лет;

- пропуски данных за полный 8-ми летний календарный ряд – 698 значений, что составляет 3% от полного 8-ми летнего ряда наблюдений; полнота многолетнего ряда – 97%; только 2013 год по критерию полноты ряда (полнота годового ряда более 95%) не может быть выбран в качестве расчетного года, поэтому расчёты для него не производились и данные этого года не включались в вычисление параметров.

На рисунке В.5 представлена многолетняя вариация среднегодовых значений скорости ветра на площадке МС о. Соловецкий.

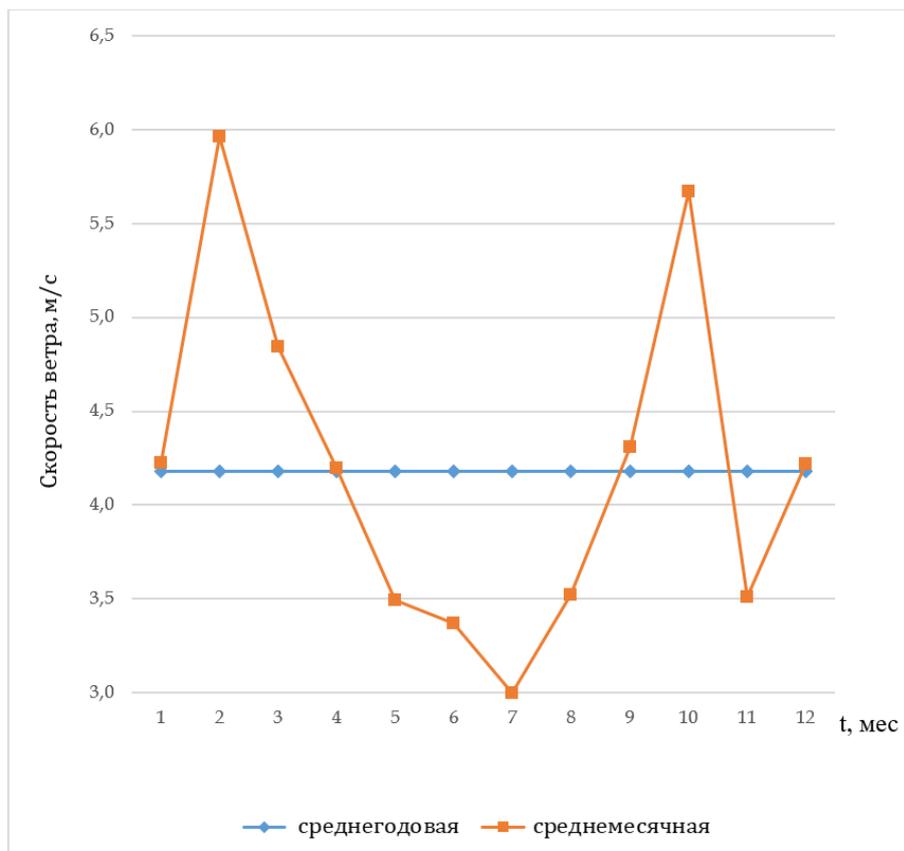


Рисунок В.5 – Многолетние вариации среднегодовой скорости ветра на площадке метеостанции

Из рисунка В.5 видно, что данных за 8 лет для прогноза динамики многолетней вариации средней скорости ветра недостаточно.

По совокупности трех критериев в качестве расчетного года был выбран 2017 год. В таблице В.9 представлены среднемноголетние и среднегодовые для характерного года (за 2017 год) основные энергетические показатели ветра, и их сравнение в виде относительных отклонений. На рисунке В.6 представлены годовая (за 2017 год) и многолетняя повторяемости скорости ветра на площадке метеостанции.

Таблица В.9 – Основные среднемноголетние и среднегодовые (за 2017 год) энергетические показатели ветра на площадке МС о. Соловецкий по данным СБД «Расписание погоды»

Показатель	Среднемноголетний	за 2017 год	$\delta, \%$
$\bar{V}_0, \frac{\text{м}}{\text{с}}$	4,07	4,03	1,65
$\bar{N}_{\text{уд}}, \text{кВт}$	139,51	189,99	-36,18
C_v	0,70	0,80	-13,63

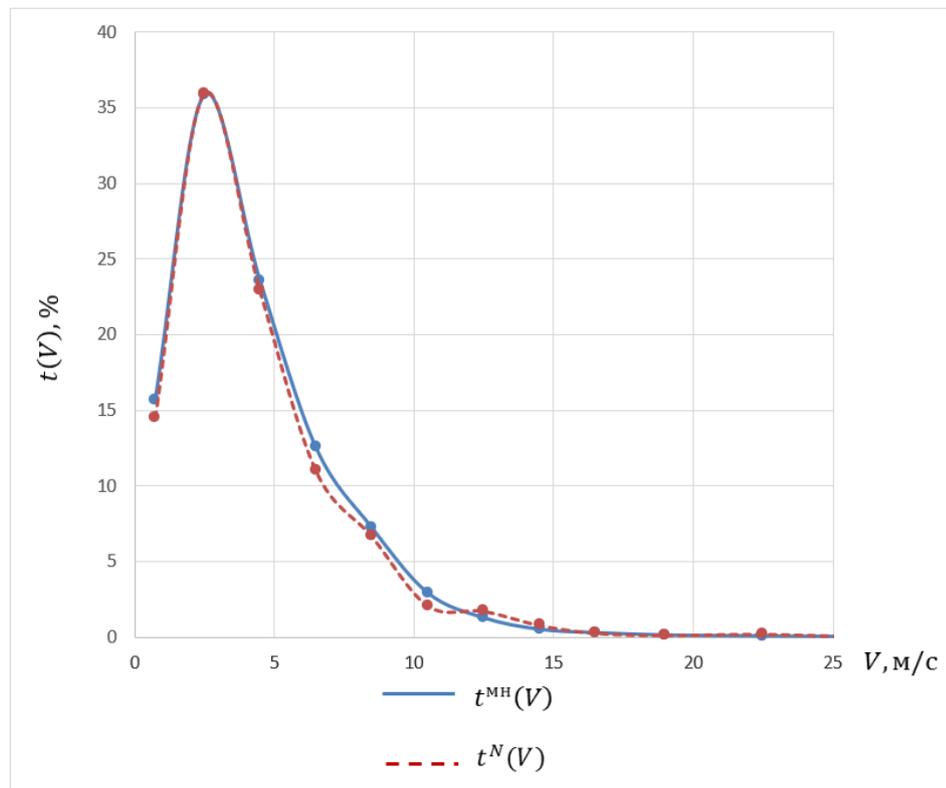


Рисунок В.6 – Многолетняя и годовая (2017 год) повторяемости скорости ветра на площадке метеостанции

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что несущественные отклонения основных энергетических характеристик ветра за расчетный 2017 год от энергетических характеристик за многолетний год сопоставимы с погрешностью измерения скорости ветра, что подтверждает правильность выбора 2017 года в качестве характерного (расчетного) года.

$$\gamma = 0,70^{-1,069} = 1,164;$$

$$\beta = \frac{\bar{V}_0}{\Gamma(1 + \frac{1}{\gamma})} = \frac{4,07}{0,91} = 4,47, \frac{\text{м}}{\text{с}},$$

Результаты расчета $t^T(V)$ представлены в таблице В.10 и на рисунке В.7.

$$\{M[t^T(V) - t(V)]\}^2 = 1,58\%^2;$$

$$\sigma_t = \sqrt{\{M[t^T(V) - t(V)]\}^2} = 1,26\%.$$

Таблица В.10 – Фактическая и теоретическая повторяемости скорости ветра и промежуточные расчеты σ_t для каждой j -ой градации при $V^{max} = 25$ м/с

$\bar{V}_j^{rp}, \frac{\text{м}}{\text{с}}$	$t(V), \%$	$t^T(V), \%$	$\Delta_j^{\phi-B}, \%$	$\Delta V_j^{rp}, \frac{\text{м}}{\text{с}}$	$M_j, \%^2$
0,75	15,7	18,7	19,95	0,75	0,7516
2,5	35,9	32,5	-12,04	1,75	0,7462
4,5	23,6	23,0	-2,58	2	0,0148
6,5	12,5	13,7	9,05	2	0,0515
8,5	7,2	7,1	-1,16	2	0,0003
10,5	2,9	3,4	16,41	2	0,0091
12,5	1,3	1,5	17,55	2	0,0019
14,5	0,5	0,6	19,48	2	0,0005
16,5	0,3	0,2	-16,12	2	0,0001
19,5	0,1	0,1	-16,23	3	0,0000
22,5	0,0	0,0	0,00	3	0,0001
25,0	0,0	0,0	0,00	2,5	0,0000
Сумма					1,58

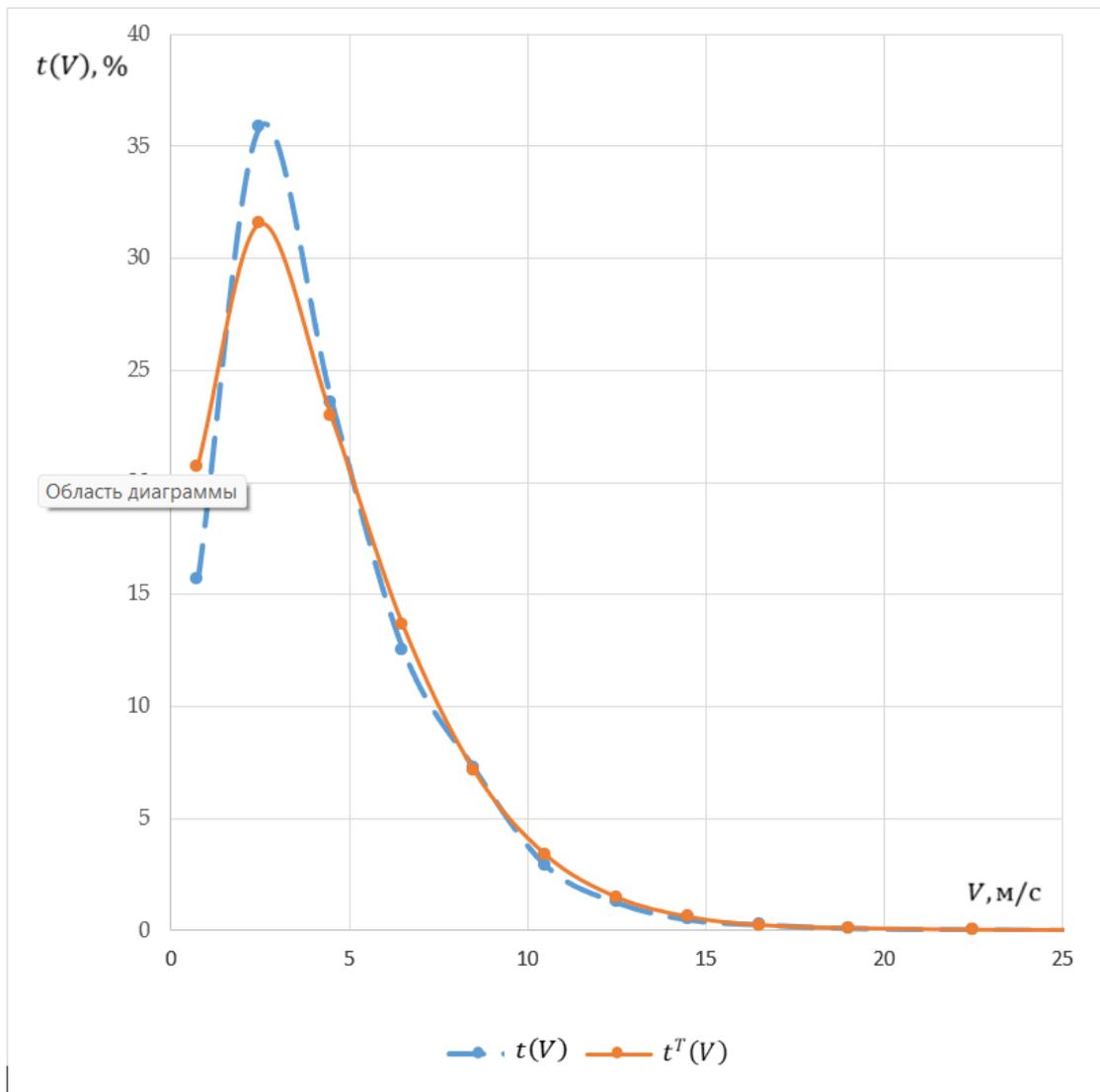


Рисунок В.7 – Фактическая и теоретическая повторяемости скорости ветра

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что среднее квадратичное отклонение $\sigma_t = 1,26\%$ не превышает допустимые 6% , т. е. теоретическое распределение Вейбулла применимо на данной МС. Также следует отметить, что относительные отклонения для каждой градации (в рабочей зоне ВЭУ) теоретической повторяемости скорости ветра по распределению Вейбулла от фактической повторяемости $\Delta_j^{\Phi-B}$ не превышают 20% .

Произведен расчёт скоростей ветра в диапазоне высот от 10 м до 110 м, результаты сведены в таблицу В.11.

Таблица В.11 – Среднегодовое скорости ветра и параметры распределения Вейбулла на разной высоте

Высота, м	10,0	30,0	50,0	70,0	90,0	110,0
m_0	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
$\bar{V}_0, \text{ м/с}$	4,07	5,01	5,52	5,89	6,17	6,41
$\gamma, \text{ о. е.}$	1,464	1,464	1,464	1,464	1,464	1,464
$\beta, \text{ м/с}$	4,55	5,60	6,17	6,58	6,90	7,17

По значениям таблицы В.11 строится вертикальный профиль среднегодовой скорости ветра, то есть зависимость среднегодовой скорости ветра от высоты. Указанная зависимость приведена на рисунке В.8.

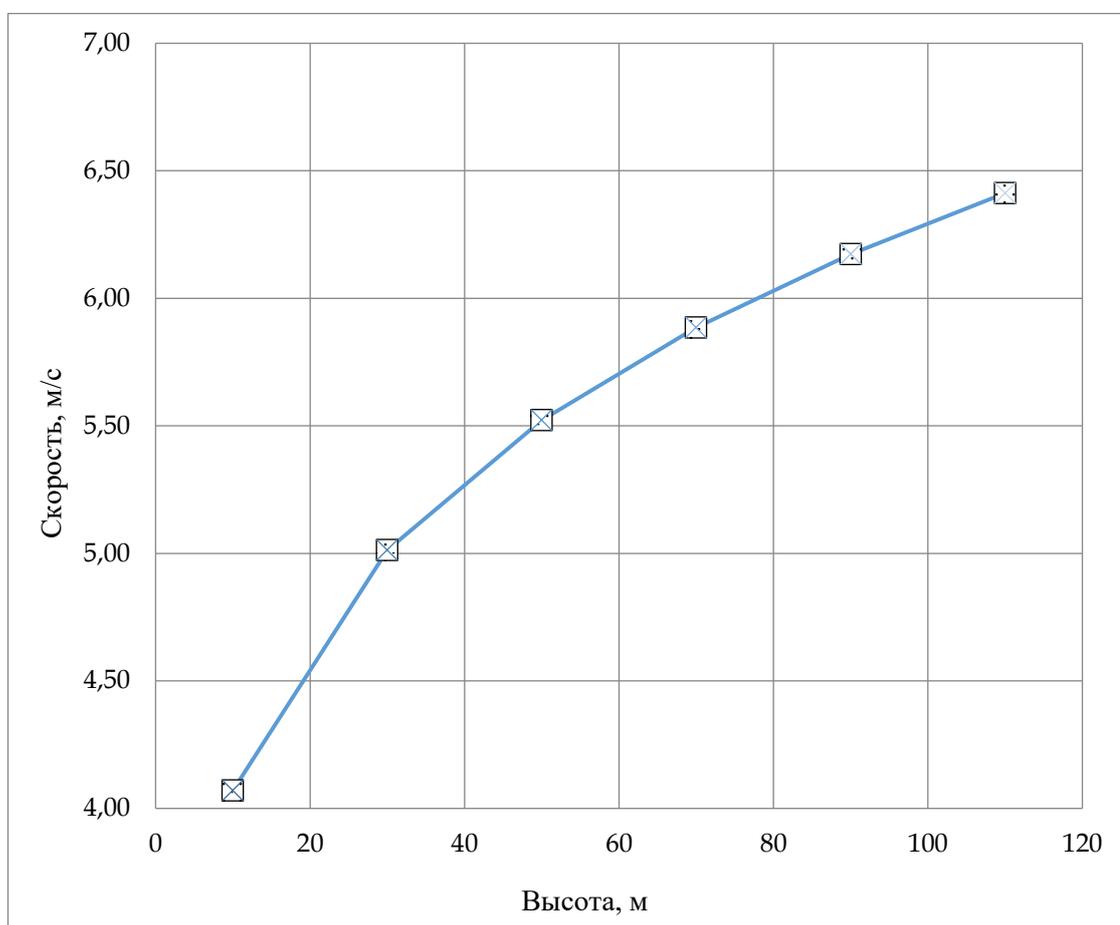


Рисунок В.8 – Вертикальный профиль среднегодовой скорости ветра

Произведен расчёт теоретической повторяемости по распределению Вейбулла на разной высоте (см. таблицу В.12, рис.В.9).

Таблица В.12 – Теоретические повторяемости скорости ветра по распределению Вейбулла на разной высоте

$\bar{V}_j^{rp}, \frac{M}{c}$	10 м	30 м	50 м	70 м	90 м	110 м
0,75	19,79	14,87	13,00	11,89	11,12	10,54
2,5	32,49	26,77	24,21	22,59	21,42	20,51
4,5	23,94	22,96	21,97	21,19	20,55	20,02
6,5	13,90	16,08	16,50	16,57	16,53	16,45
8,5	6,89	9,91	11,02	11,60	11,96	12,19
10,5	3,02	5,54	6,74	7,48	7,99	8,37
12,5	1,20	2,86	3,84	4,51	5,01	5,41
14,5	0,43	1,38	2,05	2,57	2,98	3,32
16,5	0,14	0,62	1,04	1,39	1,69	1,94
19	0,05	0,32	0,62	0,91	1,17	1,41
22,5	0,01	0,06	0,15	0,25	0,36	0,46
25	0,00	0,01	0,04	0,08	0,12	0,16

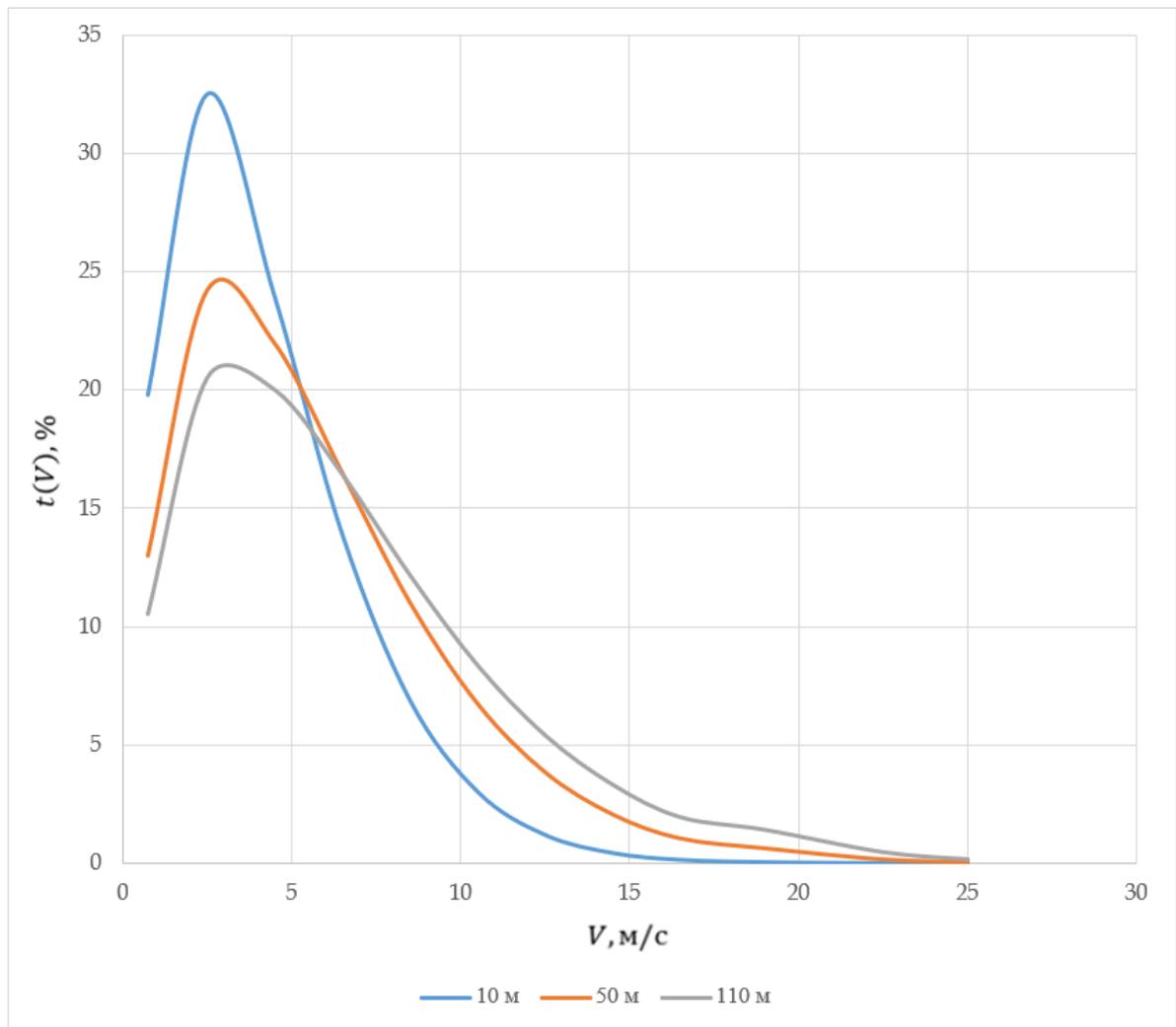
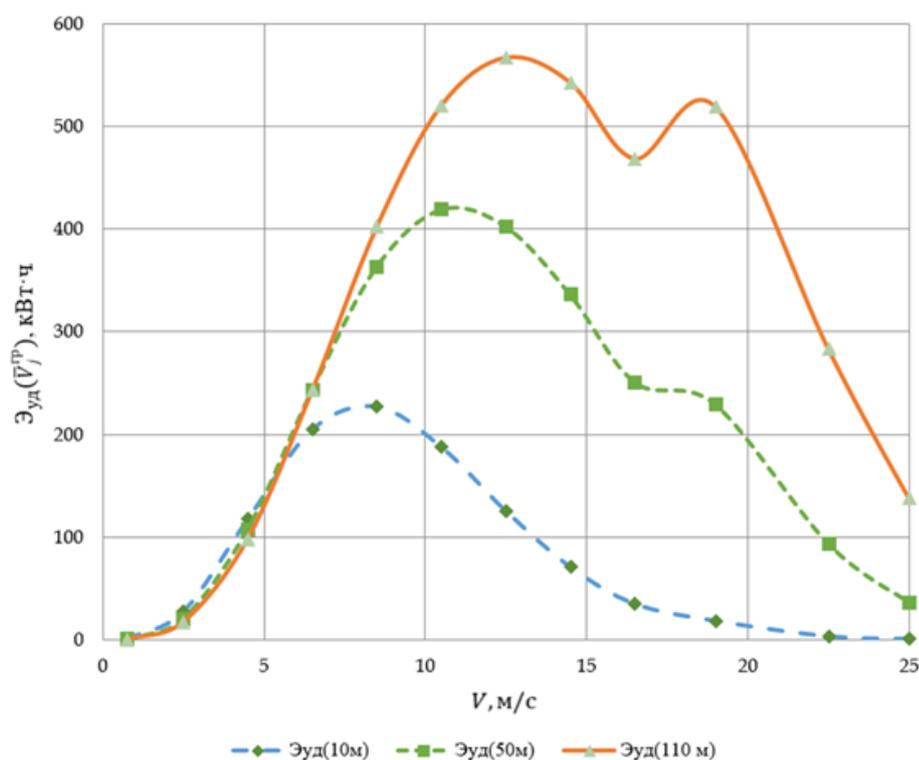


Рисунок В.9 – Теоретические повторяемости скорости по распределению Вейбулла на разной высоте

Результаты расчета $\mathcal{E}_{уд}(\bar{V}_j^{гp})$ на разной высоте получены по теоретическим повторяемостям скорости ветра представлены в таблице В.13 и на рисунке В.10.

Таблица В.13 – $\mathcal{E}_{уд}(\bar{V}_j^{гp})$ на разной высоте

$\bar{V}_j^{гp}, \frac{м}{с}$	$\bar{N}_{удj}, кВт$	$\mathcal{E}_{уд}(\bar{V}_j^{гp})$ на разной высоте, кВт·ч					
		10 м	30 м	50 м	70 м	90 м	110 м
0,75	0,26	0,448	0,337	0,294	0,269	0,252	0,239
2,5	9,58	27,257	22,460	20,312	18,953	17,973	17,212
4,5	55,86	117,143	112,364	107,509	103,681	100,574	97,973
6,5	168,35	204,941	237,193	243,311	244,409	243,829	242,571
8,5	376,46	227,316	326,853	363,376	382,619	394,288	401,906
10,5	709,62	188,037	344,490	418,976	464,978	496,816	520,345
12,5	1197,27	125,625	299,911	402,380	472,970	525,741	567,215
14,5	1868,81	70,966	225,343	336,061	420,242	487,463	542,992
16,5	2753,67	34,905	150,234	250,793	335,015	406,665	468,689
19	4204,57	18,292	118,022	228,930	333,894	430,572	519,264
22,5	6982,45	3,234	38,379	93,316	155,344	219,413	283,300
25	9578,13	0,666	12,556	36,254	66,738	101,021	137,387
$\mathcal{E}_{уд}, кВт·ч в год$		1018,83	1888,14	2501,51	2999,11	3424,61	3799,09
$\bar{N}_{удj}, кВт$		116,30	215,54	285,56	342,36	390,94	433,69
$V_E, м/с$		5,75	7,06	7,75	8,24	8,61	8,91

Рисунок В.10 – $\mathcal{E}_{уд}(\bar{V}_j^{gp})$ на разной высоте

Расчет произведены для площади размещения ВЭУ $F = 1 \text{ км}^2$. Результаты расчета представлены в таблице В.14.

Таблица В.14 – Валовые ресурсы ветра на разной высоте

Высота, м	10	30	50	70	90	110
$\mathcal{E}_{уд}$, кВт·ч в год	1018,83	1888,14	2501,51	2999,11	3424,61	3799,09
$\bar{N}_{удj}$, кВт	116,30	215,54	285,56	342,36	390,94	433,69
$\mathcal{E}^{вал}$, млн кВт·ч	50,94	94,41	125,08	149,96	171,23	189,95

В результате выполненных расчётов определены статистически обоснованные параметры ветрового ресурса площадки, включая среднегодовую скорость ветра \bar{V}_0 , коэффициент вариации C_v , параметры распределения Вейбулла, удельную энергию $\mathcal{E}_{уд}$ и среднюю удельную мощность $\bar{N}_{уд}$. На основе указанных параметров может быть сформирован непрерывный временной ряд активной мощности ветроэнергетической установки $P_{ВЭУ}(t)$, представляющий собой динамическую реализацию интегральных энергетических характеристик ветра, полученных выше.

Сформированный временной ряд будет сохранять математическое ожидание и дисперсионные характеристики исходных климатических данных и учитывать нелинейную зависимость мощности от скорости ветра. Тем самым будет обеспечена методическая преемственность между этапом оценки энергетического потенциала и этапом динамического моделирования режимов работы силового преобразователя ветроэнергетической установки (АС-DC-АС-конвертера).

Полученные временные ряды могут использоваться в качестве входных воздействий при построении математической модели адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности конвертера, а также при анализе устойчивости режимов работы ветроэнергетической установки.

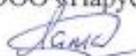
ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Документы, подтверждающие внедрение результатов
диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ

Технический Директор

ООО «Парус Электро»

 Д.Н. Лапкин

«19» 01 2026 г.

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертации Гусева Глеба Николаевича в рамках работы по разработке первого отечественного центрального сетевого солнечного инвертора ИС-1500-600, технической поддержке и сервисном обслуживании действующих солнечных электростанций суммарной мощностью свыше 300 МВт, а также проектированию солнечных электростанций Полевая и Луговая в Забайкальском крае.

Мы, нижеподписавшиеся, подтверждаем, что основные научные положения, выводы и рекомендации кандидатской диссертации Гусева Глеба Николаевича на тему: «Обоснование рациональных режимов электротехнических систем с возобновляемыми источниками энергии на основе адаптивного регулирования реактивной мощности» реализованы в рамках работы по разработке первого отечественного центрального сетевого солнечного инвертора ИС-1500-600, технической поддержке и сервисном обслуживании действующих солнечных электростанций суммарной мощностью свыше 300 МВт, а также проектированию солнечных электростанций Полевая и Луговая в Забайкальском крае, в части разработки алгоритма адаптивного регулирования реактивной мощности инверторного оборудования, а также его математического, имитационного и компьютерного моделирования.

Руководитель отдела ВИЭ



И.П. Гавриленко

Руководитель проектов



Г.Ф. Ахматханов

Руководитель группы
Схемотехники

М.Э.



Рисунок Г.1 – Акт внедрения результатов диссертационного исследования на предприятии ООО «Парус электро»



Рисунок Г.2 – Патент на полезную модель «Двухключевой повышающе-понижающий преобразователь с двухполярным выходным напряжением»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 238088**НИЗКОЧАСТОТНЫЙ СЕТЕВОЙ СИНХРОННЫЙ
ВЫПРЯМИТЕЛЬ**

Патентообладатель: *Общество с ограниченной
ответственностью "ПАРУС ЭЛЕКТРО" (RU)*

Авторы: *Рошупкин Георгий Вячеславович (RU), Матвеев
Максим Александрович (RU), Гусев Глеб Николаевич
(RU), Гайнуллин Марк Эдуардович (RU)*

Заявка № 2025122049

Приоритет полезной модели **08 августа 2025 г.**Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации **17 октября 2025 г.**Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает **08 августа 2035 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью
Сертификат 00a57064f7310945310408818e75029506
Владелец **Зубов Юлий Сергеевич**
Действителен с 04.04.2015 по 30.11.2026

Ю.С. Зубов

Рисунок Г.2 – Патент на полезную модель «Низкочастотный сетевой синхронный выпрямитель»