

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

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

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – канд. техн. наук Кутепов Антон Григорьевич

Москва – 2026

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 разработана методика 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 издании, индексируемом в

SCOPUS и Web of Science, получено 2 патента на полезную модель. Одна из статей опубликована в русскоязычном и англоязычном изданиях.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении работы представлена актуальность исследовательской тематики, очерчены рамки исследования (объект и предмет), сформулирована идея, цель и ключевые задачи, также подчёркнуты новизна, методы исследования, практическая значимость полученных результатов и соответствие диссертационного исследования паспорту научной специальности.

Первая глава посвящена анализу современного состояния и тенденций развития возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в мировой и российской практике. Показано отставание российской энергетической структуры в части ВИЭ от глобальных показателей (рисунок 1) при одновременном экспоненциальном росте установленной мощности ВИЭ в мире (рисунок 2). На рисунке 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. Рисунок 2 показывает, что суммарная мощность ВИЭ в мире к 2030 году прогнозируется на уровне свыше 17000 ГВт.

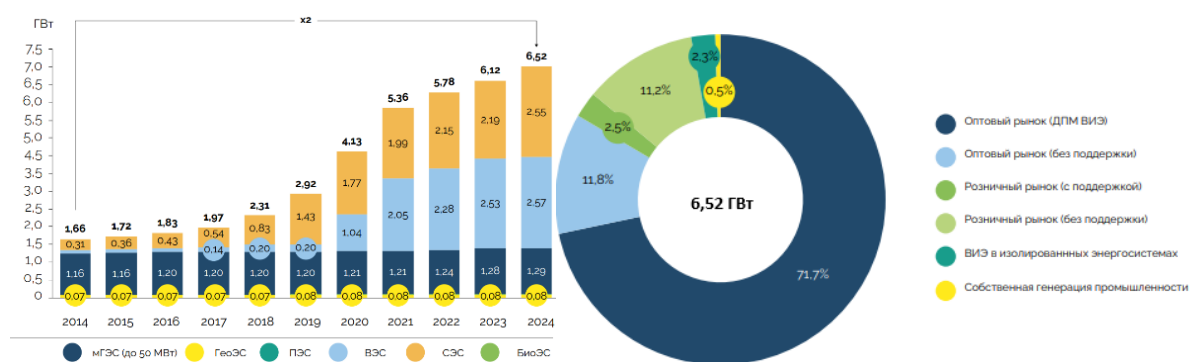


Рисунок 1 – Совокупная установленная мощность электростанций на основе ВИЭ в России

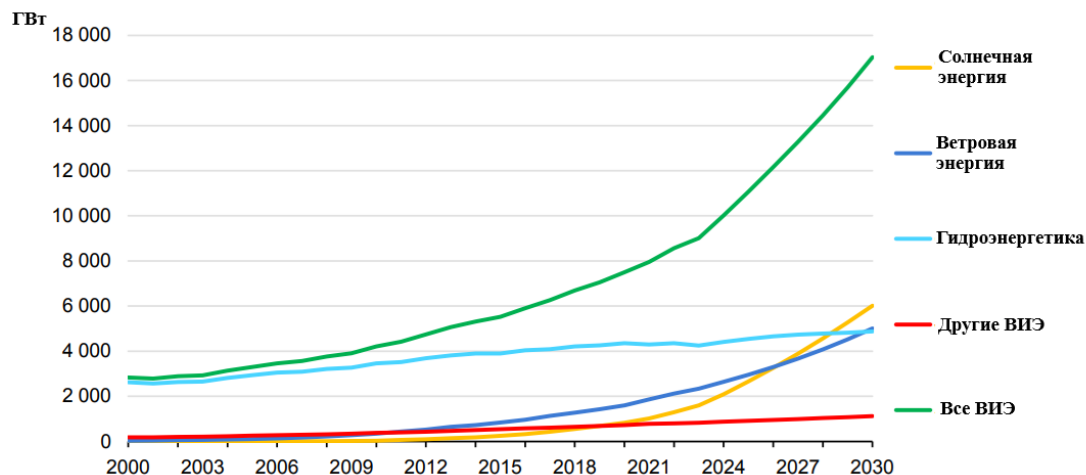


Рисунок 2 – Суммарная мощность генерации ВИЭ в мире с прогнозом развития до 2030 года

Проанализированы типовые архитектуры фотоэлектрических станций (ФЭС) включая конфигурации с системами накопления энергии (СНЭ) (рисунок 3). Интеграция накопителей позволяет сглаживать суточные колебания генерации и приближать профиль выработки к графику потребления, что повышает устойчивость режимов электротехнической системы.

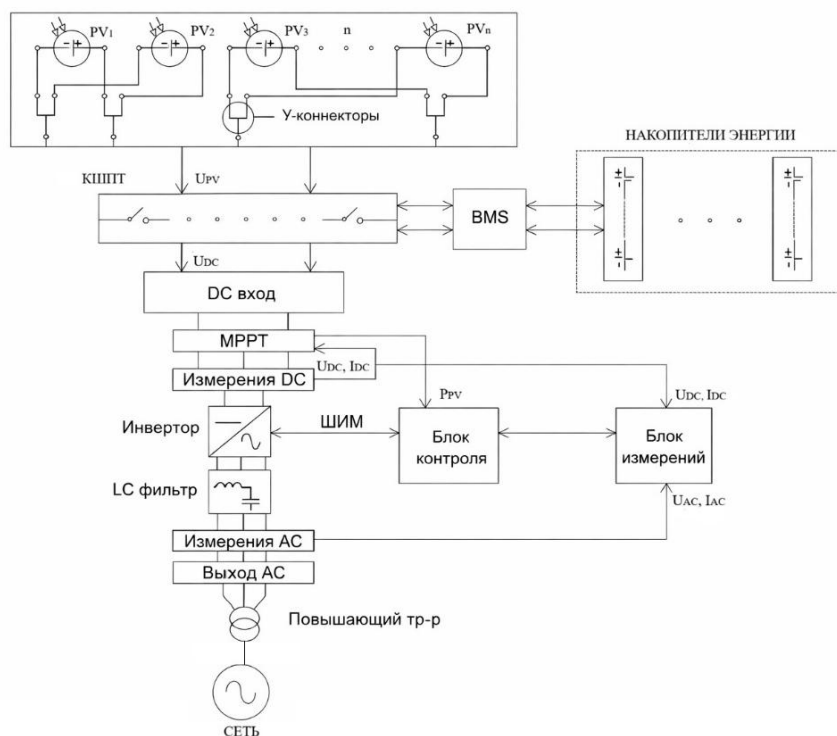


Рисунок 3 – Типовая архитектура ФЭС с возможностью применения накопителей энергии

Выполнен обзор современных методов управления установками на основе ВИЭ. В солнечных фотоэлектрических системах наибольшей эффективностью обладает алгоритм MPPT на основе роя частиц (PSO). По сравнению с традиционными методами – инкрементальным (INC) и методом возмущения и наблюдения (P&O) - применение PSO позволяет сократить переходные потери до 20-25% за счёт уменьшения времени стабилизации. Для ветроустановок показана эффективность стратегии переменной скорости и переменного шага в части управления углом атаки лопастей, позволяющей увеличить объём выработки электроэнергии на 10–15% по сравнению с режимами фиксированной скорости: FS-FP, FS-VP.

Проведённый анализ показал, что стохастический характер солнечной и ветровой генерации оказывает существенное влияние на режимы работы силовых преобразователей и устойчивость электротехнических систем с ВИЭ. При этом существующие подходы не обладают достаточным учетом режимных аспектов функционирования электротехнических систем с ВИЭ.

На основании выявленных проблем сформулирована научная задача обоснования рациональных режимов электротехнических систем с возобновляемыми источниками энергии на основе адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности с учётом стохастической природы возобновляемых ресурсов.

Во **второй главе** диссертации разработаны методики формирования стохастических значений входных параметров силового преобразователя электротехнической системы с возобновляемыми источниками энергии. Основой методик является разработанный метод, позволяющий выполнить переход от непрерывных вероятностных характеристик возобновляемых источников энергии к непрерывным временным рядам активной мощности, используемым в дальнейшем для моделирования режимов работы силового преобразователя.

На первом этапе для оценки энергетического потенциала солнечного ресурса по базе данных NASA определяются среднесуточные месячные значения суммарной $\mathcal{E}_{\Sigma i}^r$, прямой $\mathcal{E}_{пр i}^r$ и диффузной $\mathcal{E}_{д i}^r$ солнечной радиации (СР). Суточный приход суммарной солнечной радиации на горизонтальную площадку для характерного дня каждого месяца определяется выражением:

$$\mathcal{E}_{\Sigma}^r(\bar{n}_i) = \frac{\mathcal{E}_{\Sigma i}^r}{N_i}, \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут}}, \quad (1)$$

где N_i – число суток в i -ом месяце.

Диффузная составляющая для характерных суток определяется как:

$$\mathcal{E}_d^r(\bar{n}_i) = K_{di} \cdot \mathcal{E}_\Sigma^r(\bar{n}_i) \quad (2)$$

Коэффициент пересчета с суммарной на диффузную составляющую солнечной радиации на горизонтальной площадке K_{di} рассчитывается по одной из двух моделей:

- по формуле Клейна:

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

где коэффициент прозрачности атмосферы:

$$K_{0i} = \frac{\mathcal{E}_{\Sigma i}^r}{\mathcal{E}_{0i}^r} \quad (4)$$

- по формуле кафедры ГВИЭ:

$$K_{di} = 0,2K_{di}^* + 0,8K_{di}^{**} \quad (5)$$

где K_{di}^* и K_{di}^{**} определяются аппроксимационными зависимостями от номера месяца и коэффициента прозрачности атмосферы.

Выбор модели расчета выполняется по критерию минимальной среднеквадратической ошибки относительной погрешности.

После определения прямой и диффузной составляющих выполняется пересчет радиации на наклонную поверхность и определяется энергетический поток в плоскости фотоэлектрического массива.

Поскольку традиционный расчёт ограничивается интегральными среднемесячными значениями, в работе предложен переход к непрерывному временному ряду, в связи с чем разработан метод формирования стохастических значений входных параметров силового преобразователя.

Введён индекс ясности атмосферы:

$$K_t = \frac{\mathcal{E}_t}{\mathcal{E}_{0,t}}, \quad (6)$$

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 рассматриваемый период, $\frac{\text{Вт}\cdot\text{ч}}{\text{м}^2\cdot\text{т}}$.

Случайные вариации K_t описаны бета-распределением:

$$K_t \sim \text{Beta}(\alpha_m, \beta_m), \quad (7)$$

где параметры α и β определяются через математическое ожидание и дисперсию индекса ясности.

Восстановление временного ряда солнечной радиации осуществляется в два этапа. Сначала определяется суточная солнечная радиация по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{сут}} = K_t \cdot \mathcal{E}_{0,\text{сут}}, \quad \frac{\text{Вт}\cdot\text{ч}}{\text{м}^2}, \quad (8)$$

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:

$$R(t) = \mathcal{E}_{\text{сут}} \cdot f_{\text{сут}}(t), \quad (9)$$

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

$$\int_0^{24} f_{\text{сут}}(t) dt = 1. \quad (10)$$

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

$$R_{\text{ФЭМ}}(t) = R(t) \cdot k(\beta, \gamma, t), \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}, \quad (11)$$

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 определения непрерывного временного ряда мощности фотоэлектрического массива:

$$P_{\text{ФЭМ}}(t) = \eta(T_c) \cdot A \cdot R_{\text{ФЭМ}}(t), \text{Вт}, \quad (12)$$

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

Для оценки энергетического потенциала ресурса ветра выполняется статистическая обработка многолетних рядов наблюдений метеостанции с определением среднемноголетней скорости \bar{V}_0 , среднеквадратичного отклонения σ_V , коэффициента вариации C_V , удельной энергии ветра $\mathcal{E}_{\text{уд}}$, удельной мощности $\bar{N}_{\text{уд}}$.

Расчет дифференциальной повторяемости скорости ветра $t(V)$ и удельной энергии $\mathcal{E}_{\text{уд}}$ производится по формулам:

$$t(\bar{V}_j^{\text{гp}}) = \frac{m_j}{n+1}; \quad (13)$$

$$\bar{V}_j^{\text{гp}} = 0,5 \cdot (V_j^{\text{гp}} + V_{j+1}^{\text{гp}}), \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{уд}} &= \sum_{j=1}^{N_{\text{гp}}} \mathcal{E}_{\text{уд}j}(\bar{V}_j^{\text{гp}}) = \sum_{j=1}^{N_{\text{гp}}} N_{\text{уд}j} \cdot t(\Delta V_j^{\text{гp}}) \cdot T = \\ &= \sum_{j=1}^{N_{\text{гp}}} \left[\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (\bar{V}_j^{\text{гp}})^3 \cdot t(\Delta V_j^{\text{гp}}) \cdot T \right], \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{год}}, \end{aligned} \quad (15)$$

где $t(\bar{V}_j^{\text{гp}})$ – повторяемость скорости в j -ой градации, о.е.; $\bar{V}_j^{\text{гp}}$ – средняя скорость ветра в j -ой градации, м/с; $\Delta V_j^{\text{гp}}$ – интервал 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 $T = 8760$ (число часов в году), о.е.

Вероятностная структура скоростей ветра описывается двухпараметрическим распределением Вейбулла, которое имеет вид:

$$t^B(V) = \Delta V_j \cdot \frac{\gamma}{\beta} \cdot \left(\frac{V}{\beta}\right)^{\gamma-1} \cdot e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^\gamma}, \quad (16)$$

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

Разработан метод, в соответствии с которым на основе распределения Вейбулла выполняется переход от дискретного описания скорости ветра по градациям к непрерывному случайному процессу $V(t)$. Формируется непрерывный временной ряд удельной мощности ветрового потока $N_{уд}(t)$ на основе которого формируется непрерывный временной ряд активной мощности ветроэнергетической установки:

$$P_{ВЭУ}(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_p \cdot V^3(t), \text{ кВт}, \quad (17)$$

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

Разработанные методики обеспечивают математическую преемственность между этапом формирования стохастических значений входных параметров силового преобразователя электротехнической системы и этапом моделирования режимов работы силового преобразователя. Показано, что непрерывные вероятностные характеристики возобновляемых источников энергии могут быть корректно преобразованы в непрерывные временные ряды активной мощности – $P_{ФЭМ}(t)$ и $P_{ВЭУ}(t)$, сохраняющие математическое ожидание, дисперсию и вероятностную структуру исходных климатических данных.

Полученные непрерывные временные ряды используются в третьей главе при построении математической модели адаптивного регулирования реактивной мощности и исследовании рациональных режимов электротехнической системы.

Третья глава включает в себя формирование стохастических значений входных параметров силового преобразователя, разработку математической модели адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности, а также разработку имитационной модели центрального сетевого солнечного инвертора с адаптивным режимом регулирования реактивной мощности в программной среде MATLAB.

Определены годовая продолжительность солнечного сияния и годовой приход прямой солнечной радиации (таблица 1), необходимые для формирования непрерывных временных рядов активной мощности фотоэлектрических модулей.

Таблица 1 – 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	$\mathcal{E}_{\text{пр}}^{\text{г}}(\bar{n}_i)$, кВт·ч/(м ² ·сут)	N_i , дней	$t_{\text{сс}}$, часов за месяц	$\mathcal{E}_{\text{пр}}^{\text{г}}$, 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)

Произведено сравнение расчётных моделей диффузной составляющей солнечной радиации, результаты вычисления по которым приведены на рисунке 4. Анализ данных рисунка 4 показал, что среднеквадратичное отклонение диффузной составляющей СР по формуле кафедры ГВИЭ составляет 15,927 %, по формуле Клейна – 35,676 %; максимальное занижение в зимний период достигает 18,670 % и 41,667 % соответственно. По результатам анализа для дальнейшего формирования принята модель кафедры ГВИЭ.

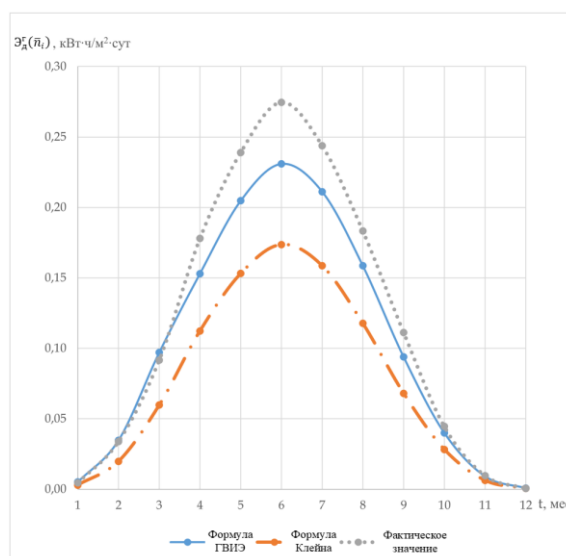


Рисунок 4 – Годовые вариации среднемесячной суточной диффузной СР в точке А на горизонтальную поверхность

Далее определены значения среднемесячного суточного прихода суммарной солнечной радиации на наклонённую к югу приемную площадку под разными углами β , приведённые в таблице 2 и позволяющие определить оптимальные углы наклона приёмной площадки солнечных панелей для каждого месяца и года в целом.

Таблица 2 – 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.

На основании анализа данных таблицы 2 определено, что оптимальный угол наклона приёмной площадки солнечных панелей в точке А для года в целом составляет $\beta = 40^\circ$, при этом годовой приход солнечной радиации увеличивается на 10,13 % по сравнению с горизонтальной поверхностью.

Полученные энергетические характеристики используются для формирования непрерывного временного ряда активной мощности фотоэлектрических модулей $P_{\text{ФЭМ}}(t)$, что обеспечивает переход от непрерывных вероятностных характеристик ресурсов Солнца к электрическим параметрам, определяющим режим работы звена постоянного тока силового преобразователя.

Следующим этапом выполнена разработка математической модели адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности, учитывающего стохастический характер входных параметров генерации и технологические ограничения преобразовательного оборудования.

Базовое допущение при работе инвертора в режиме активной генерации:

$$S = P \text{ при } \cos \varphi = 1. \quad (18)$$

Для обеспечения регулировочного запаса полная мощность искусственно ограничивается:

$$S' = S \cdot 0,99, \text{ кВА.} \quad (19)$$

Предельная реактивная мощность определяется из соотношения:

$$Q_{max} = \sqrt{S'^2 - P^2}, \text{ кВАр.} \quad (20)$$

Текущая доступная реактивная мощность рассчитывается по измеряемым параметрам инвертора (выходное напряжение $U_{inv t}$ и ток $I_{inv t}$), исходя из формулы:

$$Q_{доступ t} = \frac{U_{inv t} \cdot I_{inv t} \cdot 0,72}{1000}, \text{ кВАр.} \quad (21)$$

где 0,72 – константа, выведенная на базе лаборатории ООО «Парус электро» опытным путем.

Уставка реактивной мощности принимается как минимальное из допустимых значений:

$$Q_{уставка t} = \min(Q_{max}, Q_{доступ t}), \text{ кВАр.} \quad (22)$$

Дополнительно введены ограничения по соотношению выходного переменного и входного постоянного $U_{DC t}$ напряжений, а также по допустимому диапазону выходного напряжения инвертора:

$$0,99 \cdot U_{inv t} < \frac{U_{DC t}}{\sqrt{2}} - \Delta U_{IGBT}, \quad (23)$$

$$1,01 \cdot U_{inv.min} < U_{inv t} < 0,99 \cdot U_{inv.max}. \quad (24)$$

При нарушении приведенных выше условий в математической модели реализовано пошаговое снижение уставки реактивной мощности (шаг 10 %).

Исходя из вышеизложенного, выражения (19)-(24) математически формализуют адаптивный алгоритм регулирования реактивной мощности силового преобразователя электротехнической системы с ВИЭ.

Блок-схема математической модели адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности силового преобразователя представлена на рисунке 5.

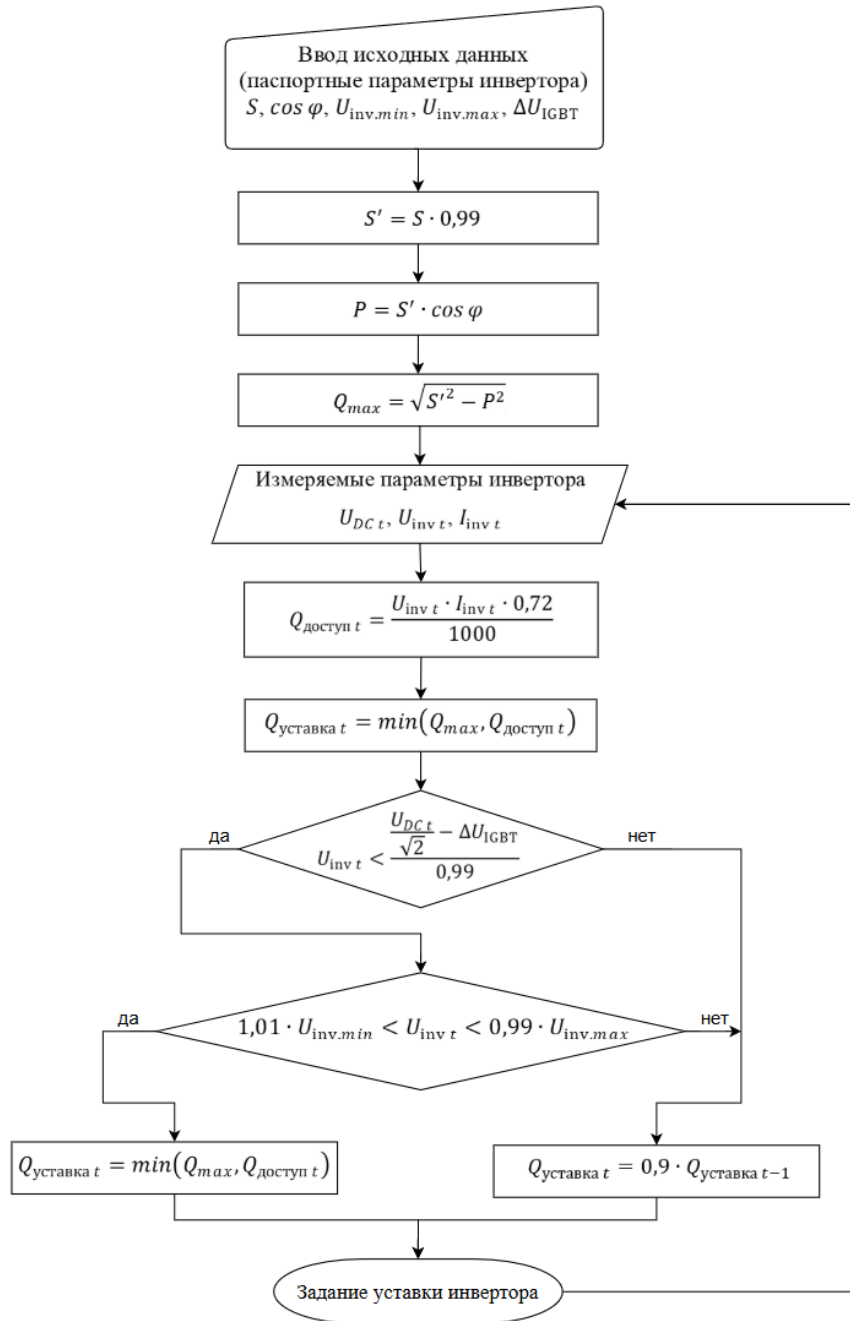


Рисунок 5 – Блок-схема математической модели адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности силового преобразователя электротехнической системы с ВИЭ

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 составе электротехнической системы с возобновляемыми источниками энергии, представленная на рисунке 6.

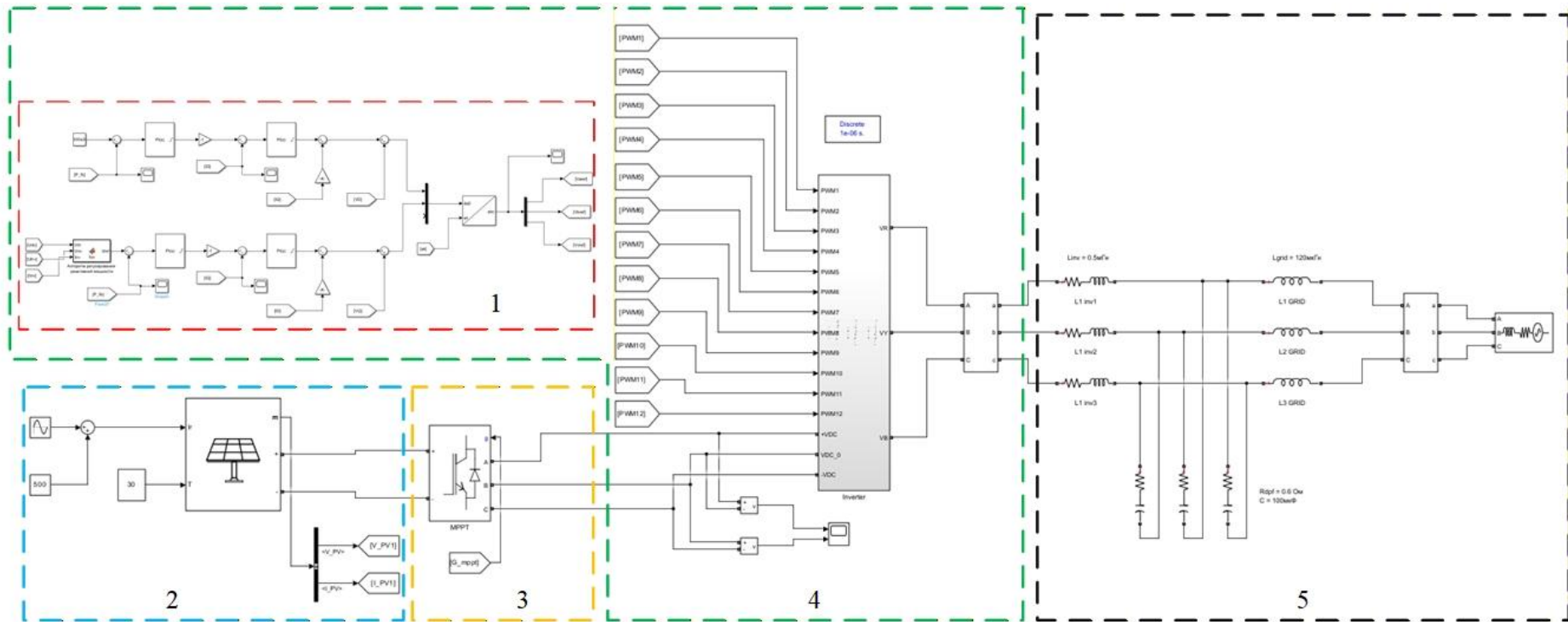


Рисунок 6 – Имитационная модель центрального солнечного инвертора в составе электротехнической системы с возобновляемыми источниками энергии в программной среде MATLAB/Simulink: 1) Контуры управления активной мощностью и адаптивного регулирования реактивной мощности; 2) Источник постоянного тока (PV-массив); 3) МРРТ-блок; 4) Силовой трёхуровневый инвертор с ШИМ; 5) LC-фильтр, сетевая нагрузка и повышающий

Имитационная модель, приведённая на рисунке 6, включает: модель фотоэлектрического массива с динамически изменяющимися входными параметрами на основе стохастически согласованных временных рядов мощности солнечной генерации $P_{ФЭМ}(t)$; силовой трёхуровневый инвертор (NPC); MPPT-блок (RefGen); 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.

Результаты имитационного моделирования приведены на рисунке 7. Проведён анализ динамики входного напряжения U_{PV} , уставки Q_{ref} и фактического значения реактивной мощности Q_{actual} , уставки I_{q_ref} и фактического значения I_{q_actual} реактивного тока.

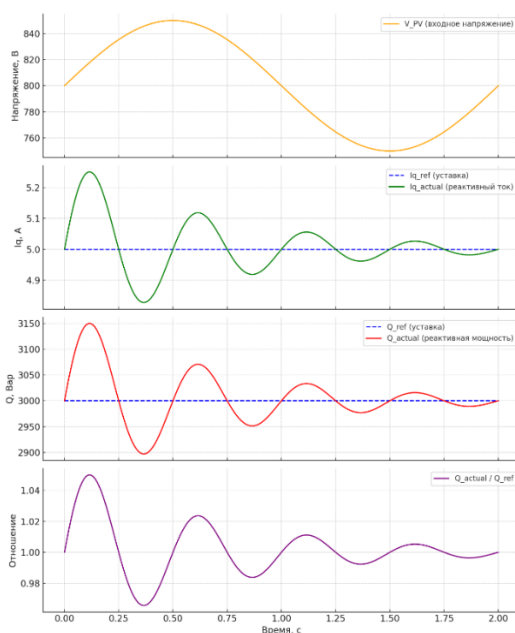


Рисунок 7 – Результаты моделирования центрального сетевого солнечного инвертора с адаптивным регулированием реактивной мощности в программной среде MATLAB

Приведённые на рисунке 7 зависимости показывают, что адаптивный алгоритм обеспечивает устойчивое следование фактического значения реактивной мощности за уставкой; при флуктуациях входного напряжения в пределах 850–900 В сохраняется устойчивость режима; переходные процессы носят затухающий характер; автоколебания отсутствуют; обеспечивается автоматическое ограничение мощности при приближении к предельным режимам.

Исходя из изложенного выше, разработанная математическая модель адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности корректно учитывает взаимосвязь активной и реактивной составляющих мощности, ограничения по полной мощности и напряжению, а также стохастический характер входных воздействий. Имитационное моделирование подтвердило возможность интеграции разработанного адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности в цифровые контроллеры и SCADA-системы сетевых инверторов.

В четвёртой главе разработана компьютерная модель адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности в среде MasterSCADA с использованием языка ST и проведена её апробация на действующей солнечной электростанции.

Разработана специализированная панель оператора (рисунок 8), 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.

S	1375.00	P	1237.50
S'	1361.00	Qдопуст	393.99
cos(φ)	0.90	Qmax	566.49
Uinv	475.00	Qуставка	354.59
Iinv	1152.01	Pdc	870419.37
Udc	580.00	Idc	1500.72

Открыть старт

Начало: 10.05.2025 01:00:00.000

Конец: 10.05.2025 01:00:00.000

Интервал: 00:00:00.000

Рисунок 8 – Специализированная панель оператора компьютерной модели адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности в программной среде MasterSCADA

Формирование логики задания уставки по реактивной мощности сопровождается визуализацией всех расчётных и измеренных параметров на панели управления, что позволяет в режиме реального времени отслеживать, как изменение входных параметров

влияет на процесс расчета итоговой уставки $Q_{\text{уставка } t}$. Кроме этого, в компьютерной модели предусмотрена возможность задания временных интервалов и формирования отчёта, что делает её пригодной как для стендовых испытаний, так и для промышленного внедрения.

Одним из ключевых этапов верификации разработанной компьютерной модели адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности стала её апробация в действующей электротехнической системе с ВИЭ – СЭС «Гафурийская».

Анализ телеметрических данных СЭС «Гафурийская» до внедрения адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности (рисунок 9) показал, что при штатной эксплуатации инверторы работали преимущественно в режиме генерации только активной мощности, что подтверждает отсутствие адаптивного Q-регулирования в исходной конфигурации.

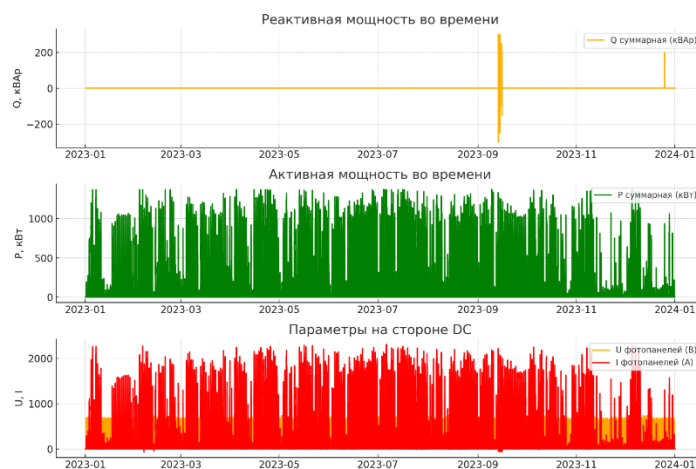


Рисунок 9 – Графики параметров инвертора СЭС Гафурийская за 2023 г.

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. Пример отчёта работы компьютерной модели изображён на рисунке 10, графики параметров инвертора с интегрированной компьютерной моделью адаптивного алгоритма приведены на рисунке 11.

Время	S	S	cos φ	P	Qдиступн	Uinv	Iinv	Udc	Qmax	УставкаPdc	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 10 – Пример отчёта работы компьютерной модели алгоритма компенсации реактивной мощности в программной среде MasterSCADA



Рисунок 11 – Графики параметров инвертора с интегрированной компьютерной моделью адаптивного алгоритма регулирования реактивной мощности

Анализ экспериментальных данных показал, что фактическое значение реактивной мощности следует за уставкой с учётом технологических ограничений. Среднее относительное отклонение фактического значения реактивной мощности от уставки реактивной мощности не превышает 10% в установившихся режимах, переходные процессы носят затухающий характер, автоколебания отсутствуют.

Полученные результаты подтверждают корректность математической модели, устойчивость адаптивного алгоритма и возможность его внедрения в составе силовых преобразователей электротехнических систем с возобновляемыми источниками энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе 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 публикаций по теме диссертации

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 / Рошупкин 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».