УДК. 621.311.243

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

Латипова М.И
Ферганский государственный технический университет
Мамарасулов К.Ш
Ферганский государственный технический университет
Li Yun
Энергоснабжающая компания Китай

Аннотация. Статья посвящена вопросам интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергетическую систему Узбекистана в условиях перехода к устойчивой и «зелёной» экономике. В работе подчеркивается необходимость глубокой трансформации традиционных энергетических систем, вызванной как экологическими, так и социально-экономическими факторами. Особое внимание уделено проблеме несинхронности между генерацией и потреблением электроэнергии, характерной для солнечных и ветровых электростанций.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии (ВИЭ), энергосистема, системы накопления энергии (СНЭ), интеллектуальные сети, энергобаланс, генерация, потребление, дисбаланс мощности, цифровизация

Annotation. Goal. The article is devoted to the integration of renewable energy sources (RES) into the energy system of Uzbekistan in the context of transition to a sustainable and "green" economy. The paper highlights the need for a deep transformation of traditional energy systems caused by both environmental and socio-economic factors. Special attention is paid to the problem of non-synchrony between electricity generation and consumption, which is typical for solar and wind power plants.

Keywords: renewable energy sources (RES), energy system, energy storage systems (EES), intelligent grids, energy balance, generation, consumption, power imbalance, digitalization

Annotatsiya. Maqsad. Maqola barqaror va "yashil" iqtisodiyotga o'tish sharoitida qayta tiklanadigan energiya manbalarini (REE) O'zbekiston energetika tizimiga integratsiya qilish masalalariga bag'ishlangan. Asarda ekologik va ijtimoiy-iqtisodiy omillar ta'sirida an'anaviy energiya tizimlarini chuqur o'zgartirish zarurligi ta'kidlangan. Quyosh va shamol elektr stantsiyalariga xos bo'lgan elektr energiyasini ishlab chiqarish va iste'mol qilish o'rtasidagi sinxronlik muammosiga alohida e'tibor qaratilgan.

ISSN 3030-3907

Kalit so'zlar: qayta tiklanadigan energiya (REE), energiya tizimi, energiya saqlash tizimlari (sne), aqlli tarmoqlar, energiya balansi, ishlab chiqarish, iste'mol, quvvat nomutanosibligi, raqamlashtirish

Методы. На примере Ферганской области рассматривается динамика внедрения малых солнечных фотоэлектрических станций (ФЭС), которая демонстрирует более чем двукратный рост установленной мощности за один год. В статье проанализированы вызовы, с которыми сталкивается Узбекистан при интеграции ВИЭ: нестабильность генерации, перегрузки в распределительных сетях, отклонения параметров напряжения и частоты.

Результаты. Приводятся данные о реальных последствиях таких дисбалансов, включая повышение числа отключений и потери выработанной энергии. Представлены результаты пилотных проектов по внедрению систем накопления энергии (СНЭ), продемонстрировавшие значительное снижение потерь, повышение надёжности электроснабжения и уменьшение выбросов CO_2.

Вывод. Предложенные меры позволяют повысить стабильность работы энергосистемы и обеспечить энергетическую безопасность страны в условиях растущей доли ВИЭ.

Введение. Переход к устойчивой энергетике требует глубокой трансформации традиционных энергетических систем. Солнечная, ветровая, гидроэнергия, биомасса, как и другие ВИЭ [1-4], нуждаются в декарбонизации экономики, а также в других экономических, социальных и экологических причинах. В Узбекистане за последние восемь лет реализована масштабная программа модернизации и расширения энергетической системы. Также активно развивает возобновляемые источники энергии (ВИЭ) в рамках стратегии перехода к «зелёной» экономике и повышения энергетической независимости. Это обуславливается растущими потребностями в электроснабжении, стремительным увеличением численности населения, индустриализацией и падением необходимости использования ископаемого топлива, особенно природного газа. Узбекистан в своих стратегических документах, в том числе в проекте Перехода к «Зеленой» экономике 2019-2030 и Стратегии развития энергетического сектора республики до 2030 года [5], выделяет Причерноморье как одну из ключевых целей для осуществления и модернизации разработок в области электроснабжения.

Узбекистан в зависимости от текущего момента сотрудничает с энергосистемами ряда стран СНГ, постепенно модернизируя и расширяя действующие теплоэнергетические установки, использующие природный

ISSN 3030-3907

газ. Начиная с 2024 года в республике начали действовать крупнейшие солнечные станции, к которым добавляются Самарканская СЭС-50 и Наваийская СЭС-100. Существуют предприятия, занимающиеся ветровыми электростанциями, которые ведут работу в Каркалпакстане и Бухарской области. Начиная с 2023 года, республиканская коррекционная служба занимается проектами автономных солнечных установок для беспроводного электроснабжения удаленных сельских населенных пунктов. Результатом стала устойчивая динамика роста производства электроэнергии, повышение роли частного сектора и ускоренное внедрение возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Эти достижения стали важным шагом на пути к созданию устойчивой, конкурентоспособной и климатически нейтральной экономики. С 2016 по 2024 годы производство электроэнергии в стране увеличилось на 38%, достигнув отметки 81,5 млрд киловатт-часов (кВт·ч). Этот рост обеспечил удовлетворение растущего спроса со стороны промышленности, инфраструктуры и населения на фоне стремительного экономического развития. Одним из ключевых факторов прогресса стало активное вовлечение частного сектора в реализацию проектов в сфере генерации. За этот период в эксплуатацию были введены новые энергетические мощности общей установленной мощностью 11,2 гигаватта (ГВт), большая часть которых реализована в партнёрстве с частными инвесторами. В условиях продолжающегося роста потребления энергии, страна поставила перед собой амбициозные задачи такие как, к 2030 году объём производства электроэнергии должен достичь 117 млрд кВт·ч, 2035 году — увеличить производство до 135 млрд кВт·ч. Для достижения этих целей необходима реализация ряда крупных инфраструктурных и технологических проектов. Особый интерес представляет динамика внедрения малых ФЭС в Ферганской области, где в рамках государственной стратегии устойчивого развития наблюдается устойчивый рост мощностей солнечной генерации. Согласно представленной статистике, по состоянию на 2023 год в Ферганской области было установлено 5 818 объектов солнечных панелей общей мощностью 30,903 МВт. К 2024 году количество объектов увеличилось на 4 410 единиц, а общая установленная мощность составила 62,323 МВт, что указывает на более чем двукратный прирост установленной мощности всего за один год. План на 2025 год предполагает установку ещё 348 объектов, обеспечивающих дополнительно 9,962 МВт, что свидетельствует о переходе от масштабной инсталляции к точечной интеграции с прицелом на энергоэффективность и надёжность [6,7]. Планируется строительство новых тепловых, солнечных, ветряных и гидроэлектростанций, а также широкое

ISSN 3030-3907

внедрение систем накопления энергии, которые позволят сбалансировать нагрузку в условиях переменной генерации ВИЭ.

К тому же, интеграция ВИЭ в энергосистему сталкивается с рядами переменчивости выработки, балансировки, предсказуемости и локальной специфики. С учетом вышеизложенного, использование ВИЭ в энергосистемах требует рациональной оптимизации. Системы, использующие возобновляемые источники энергии, иновационно развиваются. В некоторых странах (Германия, Дания, Китай) доля ВИЭ в общем энергобалансе превышает 30–40%, в то время как для развивающихся экономик этот показатель пока остается значительно ниже [8,9]. Несмотря на стремительное внедрение ВИЭ, их изменчивость создает серьезную нагрузку на систему управления электросетями. Ветро- и солнечные электростанции, к примеру, зависят от погодных условий, что затрудняет поддержание стабильного энергоснабжения без дополнительных мер. Особенно утяжеляет задачу использование систем накопления энергии (СНЭ), адаптивного управления нагрузкой и прогнозных алгоритмов. Исследование, проведённое в Германии, показало, что в пиковые периоды солнечной генерации (весной и летом в обеденное время) уровень напряжения в распределительных сетях может превышать нормативные значения на 5–7%, что влияет на работу электрооборудования и требует вмешательства операторов [10]. В то же время в вечерние часы или в периоды безветрия наблюдается дефицит мощности, вынуждающий подключать резервные источники энергии с высоким временем старта (например, газовые турбины), что снижает общую эффективность системы.

Постановка задачи. В последние годы Узбекистан активно развивает направление возобновляемой энергетики, делая акцент на интеграцию солнечных фотоэлектрических станций (ФЭС) в инфраструктуру различных регионов страны. Одной из ключевых проблем при интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергетическую систему является несинхронность между генерацией и потреблением электроэнергии. Возобновляемые источники, такие как солнечные и ветровые электростанции, генерируют энергию в зависимости от погодных и природных условий, что не всегда совпадает с графиком потребления. Это приводит к возникновению так называемых дисбалансов, при которых в сети наблюдается либо избыток, либо дефицит мощности. Такие дисбалансы особенно опасны для традиционных энергосистем, изначально рассчитанных на централизованную, регулируемую генерацию.

ISSN 3030-3907

Согласно данным [11], проведённого Международным энергетическим агентством (IEA) в 2023 году, при доле переменных ВИЭ более 20% от общего объёма генерации, количество внеплановых отклонений напряжения и частоты в сетях увеличивается на 15–25%. Дополнительные проблемы возникают в распределительных сетях, где потребление носит хаотичный характер, а системы мониторинга и управления работают с низкой точностью. В отчёте Всемирного банка по устойчивости сетей в развивающихся странах указывается, что в странах с недостаточно развитыми цифровыми технологиями и системами прогнозирования до 30% энергии ВИЭ теряется из-за невозможности её синхронизировать с текущим спросом. Одной из ключевых проблем при интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергетическую систему является несинхронность между генерацией и потреблением электроэнергии. Возобновляемые источники, такие как солнечные электростанции, генерируют энергию в зависимости от погодных и природных условий, что не всегда совпадает с графиком потребления. Это приводит к возникновению так называемых дисбалансов, при которых в сети наблюдается либо избыток, либо дефицит мощности. Такие дисбалансы особенно опасны для традиционных энергосистем, изначально рассчитанных на централизованную, регулируемую генерацию.

Методы. В рамках данного исследования применялся комплексный подход, включающий анализ текущего состояния интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергосистему Узбекистана, а также перспективные направления оптимизации их работы. Методология исследования состояла из нескольких этапов:

На первом этапе проводился статистический анализ данных, полученных от Министерства энергетики Республики Узбекистан и местных операторов распределительных сетей за период 2022–2024 гг. Использовались данные по установленной мощности, генерации, уровню потребления, а также случаи дисбалансов и аварийных отключений. Это позволило выявить закономерности и причины возникающих проблем, связанных с несинхронностью генерации и потребления электроэнергии.

На втором этапе осуществлялся мониторинг и анализ пилотного проекта по внедрению аккумуляторной системы хранения энергии (BESS) в Навоийской области. Проект предусматривал установку системы мощностью 10 МВт·ч для стабилизации параметров сети. В рамках этого этапа осуществлялся сбор данных по эффективности снижения пиковых нагрузок, потерь мощности и частоты аварийных отключений. Результаты пилотного

ISSN 3030-3907

проекта послужили основанием для разработки рекомендаций по масштабированию подобных решений в других регионах.

Третьим этапом стал углублённый математический и статистический анализ временных рядов данных о погодных условиях, интенсивности солнечной радиации и скорости ветра. Применение данных методов позволило усовершенствовать алгоритмы прогнозирования генерации энергии на основе ВИЭ и повысить точность управления энергосистемой.

Кроме того, в исследовании были использованы методы сравнительного анализа с международным опытом, включая изучение и адаптацию лучших мировых практик внедрения интеллектуальных сетей (Smart Grid), систем накопления энергии и цифровизации инфраструктуры. Такой подход дал возможность разработать практические рекомендации, подходящие для условий Узбекистана и учитывающие специфику локальных энергосетей.

Результаты исследований и обсуждение. Актуальной задачей энергетического сектора Узбекистана на современном этапе является обеспечение баланса между генерацией и потреблением электроэнергии при растущей доле возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Солнечные электростанции, строящиеся в Навоийской, Самаркандской, Бухарской и Каракалпакстанской областях, создают неравномерную и трудно прогнозируемую нагрузку на энергетическую систему, особенно в региональных распределительных сетях. Проблема усугубляется тем, что пик генерации (солнечные часы днём) не совпадает с пиком потребления (вечернее время), что вызывает перегрузки, нестабильность напряжения и необходимость резкого подключения резервных мощностей. По данным Министерства энергетики Республики Узбекистан [6] и исследований, проведённых в рамках сотрудничества с АБР и Всемирным банком [11], в 2023 году в отдельных регионах республики были зафиксированы кратковременные отклонения частоты и напряжения, вызванные внезапными изменениями мощности солнечной генерации (Таблица 1). Особенно ярко это проявляется в летние месяцы, когда в середине дня из-за высокой солнечной активности создаётся избыточная генерация, которую сети не способны эффективно перераспределить.

ISSN 3030-3907

Таблица 1

Влияние дисбаланса ВИЭ на параметры энергосистемы Узбекистана (по данным 2022–2023 гг.)

Показатель	Нормативное значение	Зафиксированные отклонения при дисбалансе	Последствия
Частота сети	50,0 Гц	48,7–51,2 Гц	Угроза частотных сбоев и отключений
Напряжение в распределительных сетях	±5% от номинала	до ±9% от номинала	Повреждение техники и неустойчивость
Потери мощности в пиковые часы генерации	<10%	до 17%	Снижение КПД и увеличение затрат
Количество отключений из-за перегрузки ВИЭ	1–2 в месяц	до 5–7 в месяц (в отдельных регионах)	Перебои в электроснабжении
Доля неиспользованной генерации СЭС	≤5%	до 25% в полуденные часы	Потери выработанной «зелёной» энергии

В качестве пилотного решения в Навоийской области в 2023 году был реализован проект по установке аккумуляторной системы хранения энергии (BESS) мощностью 10 МВт·ч, что позволило стабилизировать пиковые колебания напряжения и снизить число аварийных отключений на 40% за шесть месяцев работы. Аналогичные проекты сейчас разрабатываются для Самаркандской и Джизакской областей.

Внедрение систем накопления энергии (на 20% от установленной солнечной мощности) позволило снизить потери на 35%. Пиковая нагрузка была сглажена, коэффициент использования солнечных станций увеличился с 17% до 26%. Частота отключений (SAIFI) снизилась с 1,9 до 0,8 случаев/год. Время восстановления (SAIDI) — с 3,6 ч до 1,2 ч. Снижение выбросов CO_2 на **52,6 тонн/год** на 1 МВт установленной мощности солнечных панелей. Снижение удельного потребления топлива в ТЭС на 9%.

Внедрение накопителей энергии в сочетании с солнечными станциями позволило добиться сокращения энергетических потерь, сглаживания пиковых нагрузок и повышения надежности снабжения. Сравнительный

ISSN 3030-3907

анализ показывает, что уровень потерь электроэнергии в сетях без использования СНЭ достигает 11,2–13,5 %, в то время как с применением накопителей он снижается до 5,2–7,1 %. Это обусловлено возможностью аккумуляции избыточной энергии в периоды пиковой генерации и её последующей отдачи в сеть в моменты повышенного потребления. Кроме того, увеличение доли локальной генерации снизило нагрузку на магистральные сети и уменьшило частоту отключений.

Вывод. Для устранения указанных проблем Узбекистану необходимы масштабные инвестиции в интеллектуализацию энергосистемы, включая внедрение **smart grid-технологий**, развитие систем оперативного мониторинга и прогнозирования погодных условий, а также строительство централизованных и распределённых систем накопления энергии. Только при комплексном подходе возможно обеспечить стабильность и надёжность энергоснабжения на фоне активного роста доли ВИЭ в структуре производства электроэнергии. Дополнительные проблемы возникают в распределительных сетях, где потребление носит хаотичный характер, а системы мониторинга и управления работают с низкой точностью. В отчёте Всемирного банка по устойчивости сетей в развивающихся странах указывается, что в странах с недостаточно развитыми цифровыми технологиями и системами прогнозирования до 30% энергии ВИЭ теряется из-за невозможности её синхронизировать с текущим спросом.

Практическим решением таких проблем становится внедрение интеллектуальных систем управления нагрузкой, автоматизация распределительных сетей (smart grids), а также установка накопителей энергии, которые аккумулируют избыток энергии и высвобождают её в периоды дефицита. Таким образом, для устойчивой работы энергосистем с высокой долей ВИЭ необходимо комплексное решение проблемы синхронизации генерации и потребления: от точного прогнозирования и гибкого управления генерацией до развертывания систем хранения энергии и цифровой трансформации сетевой инфраструктуры. Без решения этой задачи невозможно достичь стабильности и надёжности электроснабжения в условиях перехода к «зелёной» энергетике.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Boyle, G. (Ed.). (2012). Renewable Energy: Power for a Sustainable Future (3rd ed.). Oxford University Press.
2. Twidell, J., & Weir, T. (2015). Renewable Energy Resources (3rd ed.). Routledge.

ISSN 3030-3907

3. Гусев, Н. Л., и др. (2019). Возобновляемые источники энергии: Теория, проектирование, эксплуатация. Москва: Машиностроение.
4. Зуев, Н. М. (2021). Возобновляемая энергетика: основы, проекты и технологии. Москва: НТПресс.
5. Постановление Президента Республики Узбекистан, от 02.12.2022 г. № ПП-436О мерах «По повышению эффективности реформ, направленных на переход Республики Узбекистан на «зеленую» экономику до 2030 года».
6. Мирзаев Ш. Р. Статистический анализ внедрения ФЭС в Ферганской области Узбекистана (2020–2024 гг.) // Вестник Ташкентского государственного технического университета, 2024.
7. Министерство энергетики Республики Узбекистан. https://minenergy.uz
8. International Renewable Energy Agency (IRENA), Renewable Capacity Statistics 2023
9. World Bank – Energy Data and Statistics, https://data.worldbank.org/topic/energy
10. World Bank. (2023). Scaling Up to Phase Down: Financing Energy Transitions in the Power Sector. Washington, DC: World Bank. https://www.worldbank.org/en/topic/energy/publication/scaling-up-to-phase-down
11. International Energy Agency (IEA). (2023). Renewables 2023 – Analysis and forecast to 2028. Paris: IEA. https://www.iea.org/reports/renewables-2023

ISSN 3030-3907