

Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» <https://resources.today>
Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling

2025, Том 12, № s4 / 2025, Vol. 12, Iss. s4 <https://resources.today/issue-s4-2025.html>

URL статьи: <https://resources.today/PDF/41FAOR425.pdf>

DOI: 10.15862/41FAOR425 (<https://doi.org/10.15862/41FAOR425>)

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Абдулло, М. А. Оптимизация зарядных энергокомплексов в горных территориях Республики Таджикистан на основе гибридных возобновляемых источников энергии / М. А. Абдулло, Ш. С. Саъдуллозода // Отходы и ресурсы. — 2025. — Т. 12. — № s4. — URL: <https://resources.today/PDF/41FAOR425.pdf>.
DOI: 10.15862/41FAOR425.

For citation:

Abdullo M.A., Sa'dullozoda Sh.S. Optimization of charging power systems in mountainous areas of the Republic of Tajikistan using hybrid renewable energy sources. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2025; 12(s4): 41FAOR425. Available at: <https://resources.today/PDF/41FAOR425.pdf>. DOI: 10.15862/41FAOR425. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 621.311:620.9

Абдулло Мамадамон Абдурахмонбек

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, Душанбе, Республика Таджикистан
Доцент кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта»
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: mamadamonabdullo@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6253-5946>

Саъдуллозода Шахриёр Саъдулло

Университет инноваций и цифровых технологий Таджикистана, Куляб, Республика Таджикистан
Доцент кафедры «Естественно-математических наук»
Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, Душанбе, Республика Таджикистан
Докторант
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: srsaidaliev@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5801-9140>

**Оптимизация зарядных энергокомплексов в
горных территориях Республики Таджикистан на основе
гибридных возобновляемых источников энергии**

Аннотация. Стремительное расширение парка электрического транспорта в Республике Таджикистан выдвигает на первый план задачу формирования надёжной зарядной инфраструктуры, способной устойчиво работать вдали от централизованных электрических сетей. Горный рельеф страны, где возвышенности занимают около 93 % территории, многократно усложняет подключение станций к магистральным линиям и порождает потребность в автономных решениях. Исследование посвящено поиску путей повышения эффективности зарядных энергокомплексов за счёт интеграции гибридных возобновляемых источников, объединяющих малые гидроэлектростанции, солнечные фотоэлектрические установки и системы накопления электроэнергии. Анализ выявил совокупность факторов, отличающих горные территории от равнинных. Среди них выделяются экстремальные перепады температур, сезонная зависимость гидрогенерации, ограниченная пропускная способность сетей и труднодоступность населённых пунктов. Зимний дефицит мощности

превышает один миллиард киловатт-часов ежегодно, тогда как потери в энергосистеме достигают пятой части годовой выработки. На фоне столь жёстких ограничений опора исключительно на централизованное снабжение признана нецелесообразной. Вместе с тем республика располагает внушительным солнечным потенциалом, оценённым примерно в 25 миллиардов киловатт-часов ежегодно, а на горных притоках рек технически осуществимо возведение более девяти сот малых гидроэлектростанций. Практическая ценность определяется возможностью применения предложенных решений при реализации Государственной программы развития электротранспорта на 2023–2028 годы и Стратегии «зелёной» экономики до 2037 года. Полученные выводы пригодны для проектирования зарядных узлов на высокогорных трассах, включая маршруты Душанбе-Чанак и Душанбе-Кульма, и закладывают методологический фундамент дальнейших изысканий в области децентрализованной энергетики.

Ключевые слова: зарядные энергокомплексы; горные регионы; Республика Таджикистан; оптимизация; возобновляемые источники энергии; малые ГЭС; солнечная энергетика; системы накопления энергии; электротранспорт; микрогрид

Введение

Переход Республики Таджикистан к модели устойчивого экологического развития требует комплексной модернизации энергетической и транспортной инфраструктуры, что напрямую связано со стратегическими целями руководства страны. В Послании Президента Республики Таджикистан Его Превосходительства Эмомали Рахмона к Меджлиси Оли (декабрь 2023 г.) было официально заявлено, что республика, благодаря диверсификации возобновляемых источников энергии и минимизации выбросов углерода в энергетике, должна фактически стать «зелёной» страной.¹ Реализация этих инициатив связана с необходимостью внедрения инновационных технологических решений в изолированных энергетических системах, характерных для высокогорных территорий страны, где централизованное электроснабжение экономически неэффективно или технически неосуществимо.

Особое место в этом процессе занимает замена традиционных автомобилей на экологически чистые аналоги. Согласно Стратегии развития «зелёной» экономики в Республике Таджикистан на 2023–2037 годы, утверждённой Постановлением Правительства РТ от 30 сентября 2022 года, № 482, одной из ключевых задач государства является постепенное увеличение доли электротранспорта в общем объеме транспортного сектора до 55 % к 2037 году, а также масштабное расширение мощностей альтернативной энергетики (в частности, увеличение выработки солнечной энергии до 800 МВт).² В этом контексте оптимизация параметров автономных систем зарядки, работающих на гибридных возобновляемых источниках энергии, представляет собой важнейший шаг на пути к развитию устойчивой экосистемы автомобильного транспорта и декарбонизации горных регионов.

Актуальность настоящего исследования обусловлена тем, что Республика Таджикистан, являясь преимущественно горной страной с 93 % территории, занятой горными массивами, испытывает хронический дефицит электроэнергии в осенне-зимний период, превышающий 1 млрд кВт·ч ежегодно.³ Следует отметить, что утверждение Постановлением Правительства

¹ Послание Президента Республики Таджикистан, Лидера нации уважаемого Эмомали Рахмона «Об основных направлениях внутренней и внешней политики республики» Меджлиси Оли Республики Таджикистан от 28 декабря 2023 года // Официальный сайт Президента Республики Таджикистан. — URL: <http://www.president.tj>.

² Стратегия развития «зелёной» экономики в Республике Таджикистан на 2023–2037 годы: утверждена постановлением Правительства Республики Таджикистан от 30 сентября 2022 года, № 482.

³ Независимая газета. Таджикистан рискует остаться зимой без света. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: https://www.ng.ru/cis/2024-09-23/5_9099_winter.html.

Республики Таджикистан № 532 от 31 октября 2022 года Государственной программы развития электротранспорта на 2023–2028 годы обозначило стратегический курс страны на электрификацию транспортного сектора.⁴ Программа включает следующие меры по развитию специальной инфраструктуры электротранспорта:

- развитие нормативно-правовой базы для специальной инфраструктуры электротранспорта;
- определение тестовых площадок и дорог республиканского значения для создания специальной инфраструктуры для электротранспорта;
- определение основных направлений развития сетей зарядных станций и поэтапное их расширение;
- разработка механизма финансирования части затрат на создание специальной инфраструктуры;
- организация зарядной инфраструктуры большой мощности (более 22 кВт) — не менее 40 единиц, с возможностью зарядки до 80 % за 20–30 минут;
- организация зарядной инфраструктуры средней мощности (до 22 кВт) — не менее 850 единиц, с возможностью зарядки до 80 % за 2–10 часов.

Вместе с тем развёртывание зарядной инфраструктуры в горных регионах республики сталкивается с комплексом технических, экономических и природно-климатических ограничений, требующих разработки специализированных подходов к оптимизации энергокомплексов.

Предыдущие исследования [1] провели всестороннее технико-экономическое обоснование инфраструктуры электротранспорта в Республике Таджикистан, продемонстрировав консервативный характер постепенного перехода от мобильных зарядных систем с традиционными генераторами к гибридным электростанциям (литий-ионные батареи в Китае с фотоэлектрическими панелями и ветряными турбинами). Однако продолжающееся развёртывание таких систем в сложных условиях высокого уровня требует решения принципиально новой проблемы: математической оптимизации параметров генерирующей и накопительной мощности с учетом стохастической природы как возобновляемых источников энергии, так и кривых нагрузки.

Особое внимание заслуживает тот факт, что мощность энергосистемы Таджикистана составляет 5 757 МВт, при этом на долю гидроэлектростанций приходится 87,6 % всей установленной мощности.⁵ Подобная зависимость от гидрогенерации формирует выраженную сезонную неравномерность, существенно осложняющую стабильное электроснабжение зарядной инфраструктуры в зимние месяцы. В 2024 году производство электроэнергии в стране составило 22,4 млрд кВт·ч, а потери в энергосистеме достигли 4,5 млрд кВт·ч, что эквивалентно 20 % от общего объёма выработки.⁶ Проблематика оптимизации децентрализованных энергосистем горных территорий получила разработку в трудах таджикских исследователей, в частности А.Д. Ахроровой, М.К. Халимджановой и Х.Х. Холова [2], Г.Н. Петров, Х.М. Ахмедова, Х.С. Каримова и К. Кабутова [3], М.А. Кудусова, У. Мадвалиева, Р. Бахромзода, А.Р. Мукумова [4], а также в работе Б. Сироджева [5], однако адаптация существующих подходов к задачам развёртывания зарядной инфраструктуры в специфических условиях горного Таджикистана остаётся

⁴ Avesta.tj. Таджикистан активно внедряет программу развития электротранспорта. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://avesta.tj/2025/07/17/tadzhikistan-aktivno-vnedryaet-programmu-razvitiya-elektrotransporta/>.

⁵ Министерство энергетики и водных ресурсов Республики Таджикистан. Электроэнергетическая система. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: https://www.mewr.tj/?page_id=552.

⁶ Avesta.tj. В Таджикистане в 2024 году произведено 22,4 млрд кВт·ч электроэнергии. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://avesta.tj/2025/01/30/v-tadzhikistane-v-2024-godu-proizvedeno-22-4-mlrd-kvt-ch-elektroenergii/>.

недостаточно исследованной. Наряду с этим работа И.Ш. Норматова и Г.Н. Петрова систематизировала экономические вопросы развития гидроэнергетики республики [6], а исследования С.Р. Чоршанбиева, Г.В. Шведова проанализировали структуру потребления электроэнергии по отраслям Республики Таджикистан [7].

При определении мест размещения автономных зарядных комплексов необходимо учитывать пространственную автономность распределения возобновляемых источников энергии в пределах республики. Согласно комплексной многокритериальной оценке мощности солнечной и ветровой энергетики, проведенной в данной работе, значительные площади Таджикистана обладают высокими индексами пригодности для развертывания объектов альтернативной энергетики. В горных и предгорных районах характерны наиболее стабильные показатели ветрового потока и уровня инсоляции.

Объектом исследования выступают зарядные энергокомплексы, функционирующие в горных регионах Республики Таджикистан.

Предметом исследования являются методы и механизмы оптимизации режимов работы зарядных энергокомплексов на основе гибридных возобновляемых источников энергии.

Целью исследования является разработка научно обоснованного подхода к оптимизации зарядных энергокомплексов в горных территориях Республики Таджикистан с учётом потенциала возобновляемых источников энергии и инфраструктурных ограничений.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи.

1. Систематизировать факторы, определяющие специфику функционирования зарядных энергокомплексов в горных территориях Республики Таджикистан.
2. Провести сравнительный анализ подходов к оптимизации гибридных энергосистем с зарядной инфраструктурой в условиях горной местности.
3. Разработать авторскую классификацию факторов оптимизации зарядных энергокомплексов для горных регионов.

Научная новизна исследования состоит в формировании авторской классификации факторов оптимизации зарядных энергокомплексов горных территорий с учётом природно-климатических, инфраструктурных и энергетических особенностей Республики Таджикистан, а также в обосновании приоритетности гибридных энергосистем на основе микрогидрогенерации и фотовольтаики для обеспечения устойчивого функционирования зарядной инфраструктуры.

Практическая значимость определяется возможностью использования результатов исследования при реализации Государственной программы развития электротранспорта в Республике Таджикистан на 2023–2028 годы.

1. Материалы и методы

Методологическую основу исследования составляют системный и сравнительный подходы, позволяющие рассматривать зарядные энергокомплексы как элемент целостной энергетической инфраструктуры горных территорий. Метод системного анализа применён для выявления взаимосвязей между природно-климатическими факторами горной местности и параметрами функционирования зарядной инфраструктуры. Сравнительный метод использован для сопоставления подходов к оптимизации гибридных энергосистем в международной практике и в условиях Республики Таджикистан. Метод классификации применён для формирования авторской типологии факторов оптимизации. Информационную базу составили нормативные документы Республики Таджикистан, аналитические отчёты Международного

энергетического агентства (МЭА), данные Министерства энергетики и водных ресурсов Республики Таджикистан, труды учёных Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими, Физико-технического института имени С.У. Умарова Академии наук Республики Таджикистан, Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии АН РТ, научные публикации из баз eLibrary, CyberLeninka, ScienceDirect, а также материалы USAID и Фонда Ага Хана.

2. Результаты и обсуждение

Стоит обратить внимание на то, что специфика функционирования зарядных энергокомплексов в горных территориях Республики Таджикистан определяется совокупностью факторов, принципиально отличающих условия развёртывания зарядной инфраструктуры от равнинных территорий. По данным Министерства энергетики и водных ресурсов, потребители электроэнергии в горных и сельских районах республики в осенне-зимний период получают электроэнергию лишь 8–10 часов в сутки вследствие ограничений, вводимых компанией ОАХК «Барки Точик». ⁷ Показательно, что за первое полугодие 2025 года потери электроэнергии в энергосистеме составили 2 млрд 262,2 млн кВт·ч (17,2 % от общего объёма выработки), что на 3,3 % меньше, чем за аналогичный период 2024 года. Как справедливо отмечают А.Д. Ахророва, М.К. Халимджанова и Х.Х. Холов, высокий уровень потерь электроэнергии в сетях является одним из ключевых факторов, определяющих дефицит мощности в зимний период [8]. Систематизация ключевых факторов, определяющих специфику функционирования зарядных энергокомплексов в горных территориях, представлена в таблице 1.

Таблица 1

Факторы, определяющие специфику функционирования зарядных энергокомплексов в горных территориях Республики Таджикистан

| Группа факторов | Характеристика | Количественные параметры | Влияние на зарядную инфраструктуру |
|------------------|---|---|---|
| Климатические | Экстремальные температуры, высокая солнечная инсоляция | от -50°C зимой в Мургабе (ГБАО) до +40°C летом, 280–330 солнечных дней в году | Снижение ёмкости аккумуляторов, возможность солнечной генерации |
| Инфраструктурные | Ограниченная пропускная способность сетей, удалённость от магистральных ЛЭП | Потери 20 % (2024 г.), электроснабжение 8–10 часов зимой | Невозможность прямого подключения быстрых зарядных станций |
| Гидрологические | Сезонная зависимость гидрогенерации, 87,6 % мощности на ГЭС | Дефицит более 1 млрд кВт·ч зимой, выработка 22,4 млрд кВт·ч (2024 г.) | Необходимость резервирования и балансировки генерации |
| Рельефные | Горный рельеф, высоты до 7495 м, 93 % территории | Труднодоступность, отсутствие автодорог в ряде районов | Необходимость автономных решений, логистические ограничения |

Составлено автором на основе анализа материалов⁸

Данные таблицы 1 свидетельствуют о многофакторном характере ограничений, сопровождающих развёртывание зарядной инфраструктуры в горных территориях. Следует обратить внимание на то, что сочетание климатических, инфраструктурных и гидрологических

⁷ Независимая газета. Таджикистан рискует остаться зимой без света. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: https://www.ng.ru/cis/2024-09-23/5_9099_winter.html.

⁸ Министерство энергетики и водных ресурсов Республики Таджикистан. Электроэнергетическая система. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: https://www.mewr.tj/?page_id=552.

Министерство иностранных дел Республики Таджикистан. Обзор энергетического сектора. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://mfa.tj/ru/main/tadzhikistan/energetika>.

факторов формирует уникальный профиль вызовов, не имеющий прямых аналогов в мировой практике развития электротранспортной инфраструктуры.

В развитие данного положения необходимо проанализировать потенциал возобновляемых источников энергии для обеспечения устойчивого функционирования зарядных энергокомплексов. Примечательно, что, как установили Х.М. Ахмедов, Х.С. Каримов и К. Кабутов, Республика Таджикистан располагает значительным потенциалом солнечной энергии, оцениваемым в 25 млрд кВт·ч в год, при этом интенсивность суммарной солнечной радиации достигает 360–1 120 МДж/м² в горной местности. Вместе с тем выработка солнечной энергии в 2024 году составила лишь 1,5 млн кВт·ч (0,01 % общего объема генерации)⁹. Принципиально важным представляется и тот факт, что, по оценкам Г.Н. Петрова и А. Ибрахима, на притоках рек в горных регионах республики технически возможно и экономически целесообразно строительство более 900 малых ГЭС мощностью от 100 до 3 000 кВт. Концептуальная схема оптимизации зарядного энергокомплекса на основе гибридных ВИЭ представлена на рисунке 1.

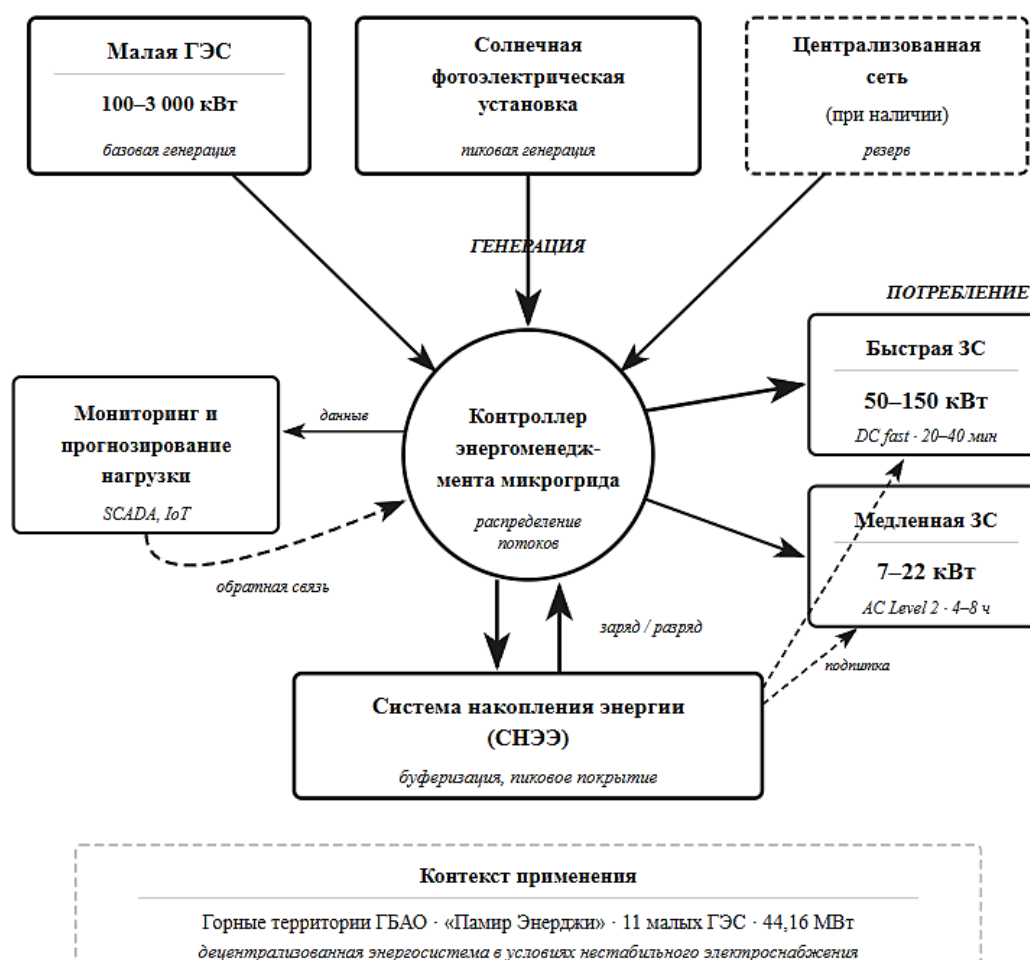


Рисунок 1. Концептуальная схема гибридного зарядного энергокомплекса для горных территорий Республики Таджикистан (разработано авторами)

Представленная на рисунке 1 схема демонстрирует принцип интеграции нескольких источников генерации и систем накопления в единый управляемый контур, обеспечивающий бесперебойное функционирование зарядной инфраструктуры в условиях нестабильного централизованного электроснабжения.

⁹ Ставка на солнце. Таджикистан ищет новые источники энергии. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://asiaplustj.info/en/node/354908>.

Следует отметить, что опыт компании «Памир Энерджи», управляющей одиннадцатью малыми и мини-ГЭС общей установленной мощностью 44,16 МВт в ГБАО¹⁰, подтверждает техническую реализуемость децентрализованных энергосистем в высокогорных условиях. Как подчёркивает М.М. Аламшоева, гидроэнергетика Таджикистана обладает значительными перспективами развития, позволяющими обеспечить энергетическую независимость страны [9].

Особое внимание заслуживает анализ международного опыта оптимизации микрогридов с зарядной инфраструктурой. Согласно данным IEA Global EV Outlook 2025, на конец 2024 года в мире функционировало более 4 миллионов публичных медленных зарядных устройств, при этом Китай занимал около 60 % мирового рынка.¹¹ Сравнительный анализ подходов к оптимизации гибридных энергосистем с зарядной инфраструктурой представлен в таблице 2.

Таблица 2

Сравнительный анализ подходов к оптимизации гибридных энергосистем с зарядной инфраструктурой

| Подход | Научная школа, исследования | Метод оптимизации | Результат (снижение затрат) | Применимость для горных территорий Таджикистана |
|---|---|---|---|---|
| Гибридные МГЭС для децентрализованных зон | Ахророва А.Д., Халимджанова М.К., Холов Х.Х. (ТТУ имени М.С. Осими) | Анализ дефицита мощности, оптимизация гибридных МГЭС | Повышение энергобезопасности горных районов | Высокая (разработан для горных районов РТ) |
| Комплексное использование ВИЭ для автономных потребителей | Ахмедов Х.М., Каримов Х.С., Кабутов К. (ФТИ АН РТ) | Оценка потенциала ВИЭ, моделирование автономных систем | Обоснование целесообразности комплексных энергокомплексов | Высокая (создан для условий Таджикистана) |
| Оптимизация микрогридов с ИИ | Зарубежные исследования (ScienceDirect, 2025) ¹² | Алгоритмы онлайн-обучения для микрогридов | Снижение операционных затрат на 14–25 % | Средняя (требует адаптации к горным условиям) |
| Оптимизация ветро-солнечных микрогридов с накопителями | Зарубежные исследования (PMC, 2024) ¹³ | Трёхмерная целевая функция (экономика, надёжность, энергия) | Оптимальное соотношение компонентов | Средняя (необходим учёт гидрогенерации) |

Составлено авторами на основе анализа материалов¹⁴

Результаты, отражённые в таблице 2, позволяют сделать вывод о том, что для условий горных территорий Таджикистана наиболее перспективными являются подходы, разработанные таджикскими научными школами и адаптированные к специфике республики, в сочетании с международными методами оптимизации микрогридов. Эти результаты расширяют выводы, полученные ранее для мобильных систем. В отличие от мобильных зарядных станций, где ключевыми ограничениями были вес и размер прицепов и платформ, для стационарных горнодобывающих комплексов на первый план выходят критерии минимизации стоимости

¹⁰ Министерство энергетики и водных ресурсов Республики Таджикистан. Электроэнергетическая система. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: https://www.mewr.tj/?page_id=552.

¹¹ IEA. Global EV Outlook 2025. Electric Vehicle Charging. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025/electric-vehicle-charging>.

¹² Renewable microgrid optimization using AI: A B-SLR approach and future research directions // ScienceDirect. — 2025. — [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484725006948>.

¹³ Optimizing wind-PV-battery microgrids for sustainable and resilient residential communities // PMC. — 2024. — [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC12234665/>.

¹⁴ Renewable microgrid optimization using AI: A B-SLR approach and future research directions // ScienceDirect. — 2025. — [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484725006948>.

Optimizing wind-PV-battery microgrids for sustainable and resilient residential communities // PMC. — 2024. — [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC12234665/>.

жизненного цикла и приведенной стоимости энергии при обеспечении бесперебойного баланса мощности в условиях сезонного маловодья на малых гидроэлектростанциях.

В развитие данного анализа необходимо подчеркнуть значение стратегических инициатив Правительства Республики Таджикистан в области развития возобновляемой энергетики. В рамках Международного инвестиционного форума «Душанбе Инвест — 2025» были подписаны документы о строительстве солнечных электростанций совокупной мощностью 2 000 МВт.¹⁵ Наряду с этим в 2024 году китайская компания China Pingmei Shenma Holding Group начала строительство СЭС «Пяндж» и «Дангара» общей мощностью 1 ГВт.¹⁶ Как подчёркивается в Национальной стратегии развития Республики Таджикистан на период до 2030 года, создание эффективной системы управления рисками и мониторинга энергетической безопасности является одной из ключевых задач энергетической политики.¹⁷ Как обоснованно подчёркивает И. Томберг, энергетическая политика и энергетические проекты Центральной Евразии требуют комплексного подхода, учитывающего региональные особенности [10].

На основе проведённого анализа автором предложена классификация факторов оптимизации зарядных энергокомплексов для горных регионов, дифференцированная по уровням управления, как представлено в таблице 3.

Таблица 3

Авторская классификация факторов оптимизации зарядных энергокомплексов для горных регионов Республики Таджикистан

| Уровень оптимизации | Факторы | Инструменты | Ожидаемый эффект |
|---------------------|--|--|--|
| Генерационный | Сезонность гидрогенерации, солнечная инсоляция (360–1 120 МДж/м ²), наличие горных рек | Гибридные системы МГЭС + СЭС, балансировка генерации | Снижение зависимости от централизованной сети на 40–60 % |
| Накопительный | Суточная неравномерность нагрузки, ночной дефицит солнечной генерации | Литий-ионные СНЭЭ, гидроаккумулирование (ГАЭС) | Обеспечение круглосуточной доступности зарядки |
| Управленческий | Прогнозирование нагрузки, оптимальное распределение мощности | ИИ-алгоритмы, SCADA-системы, контроллеры микрогрида | Снижение операционных затрат на 14–25 % |
| Инфраструктурный | Удалённость, горный рельеф, ограниченность транспортных коммуникаций | Модульные решения, мобильные зарядные комплексы | Охват труднодоступных населённых пунктов |

Составлено автором на основе анализа материалов¹⁸

Данные таблицы 3 свидетельствуют о необходимости многоуровневого подхода к оптимизации зарядных энергокомплексов, в котором генерационный, накопительный, управленческий и инфраструктурный уровни дополняют друг друга, формируя целостный

¹⁵ Ставка на солнце. Таджикистан ищет новые источники энергии. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://asiaplustj.info/en/node/354908>.

¹⁶ Ведомости. В Таджикистане появится китайская солнечная электростанция. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.vedomosti.ru/business/news/2024/07/15/1050083-tadzhikistane-poyavitsya>.

¹⁷ Министерство иностранных дел Республики Таджикистан. Краткая информация о НСР-2030. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.mfa.tj/ru/main/view/2987/kratkaya-informatsiya-o-natsionalnoi-strategii-razvitiya-tadzhikistana-na-period-do-2030-goda>.

¹⁸ Renewable microgrid optimization using AI: A B-SLR approach and future research directions // ScienceDirect. — 2025. — [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484725006948>.

Optimizing wind-PV-battery microgrids for sustainable and resilient residential communities // PMC. — 2024. — [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC12234665/>.

Avesta.tj. Таджикистан активно внедряет программу развития электротранспорта. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://avesta.tj/2025/07/17/tadzhikistan-aktivno-vnedryaet-programmu-razvitiya-elektrotransporta/>.

контур обеспечения эффективности зарядной инфраструктуры. Принципиальные основания представляет и тот факт, что Президент Республики Таджикистан Эмомали Рахмон в декабре 2024 года заявил, что начиная с мая 2027 года за счёт производства электроэнергии на Рогунской ГЭС и каскаде ГЭС на реке Вахш дефицит электроэнергии в стране будет полностью устранён.¹⁹

Вместе с тем Европейский Союз в 2025 году выделил средства на проект по снижению потерь в электросетях Таджикистана, включающий цифровизацию систем учёта.²⁰ Как подчёркивает У. Темуров, устойчивое развитие энергетики Таджикистана неразрывно связано с расширением использования малой энергетики в труднодоступных горных районах [11].

Выводы

Систематизация факторов, определяющих специфику функционирования зарядных энергокомплексов в горных территориях Республики Таджикистан, показала, что совокупность климатических, инфраструктурных, гидрологических и рельефных ограничений формирует уникальный профиль вызовов, требующий применения специализированных технических решений. Установлено, что при потерях электроэнергии в 20 % (2024 г.) и веерных отключениях до 14–16 часов в сутки в зимний период функционирование зарядной инфраструктуры в горных районах на основе исключительно централизованного электроснабжения является нецелесообразным.

Сравнительный анализ подходов к оптимизации гибридных энергосистем продемонстрировал, что научные школы Таджикистана (ТТУ имени М.С. Осими, ФТИ имени С.У. Умарова АН РТ, Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии АН РТ) накопили значительный теоретический и эмпирический задел в области децентрализованного энергоснабжения горных территорий, который может быть адаптирован к задачам развёртывания зарядной инфраструктуры в сочетании с международными методами оптимизации микрогридов.

Разработанная автором четырёхуровневая классификация факторов оптимизации зарядных энергокомплексов (генерационный, накопительный, управленческий, инфраструктурный) обеспечивает методологическую основу для проектирования зарядной инфраструктуры в горных регионах.

Потенциал строительства более 900 малых ГЭС, солнечная инсоляция до 1 120 МДж/м² в горной местности и стратегические инвестиции в солнечную генерацию совокупной мощностью более 3 ГВт формируют объективные предпосылки для масштабирования гибридных зарядных энергокомплексов в ближайшей перспективе.

Результаты оптимизации структуры гибридного энергетического комплекса согласуются с выводами многокритериальной оценки потенциала возобновляемой энергии в Таджикистане.

Синергетический эффект комбинированного использования солнечной генерации и малых гидроэлектростанций (или ветротурбин) обеспечивает экономическое преимущество в децентрализации энергоснабжения и транспортной независимости в районах, определенных как наиболее перспективные для развития альтернативной энергетики.

¹⁹ Энергонезависимость Таджикистана к 2027 году. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://asiaplustj.info/en/node/353784>.

²⁰ Евросоюз поможет Таджикистану снизить потери в электросетях. — [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <https://www.asiaplustj.info/ru/news/tajikistan/economic/20250315/evrosoyuz-pomozhet-tadzhikistanu-snizit-poteri-v-elektrosetyah-i-ozelenit-hlopkovii-sektor>.

Основные научные и практические выводы:

1. Стратегический императив. Доказано, что развитие инфраструктуры зарядки электромобилей на основе локальных гибридных возобновляемых источников энергии является важнейшим элементом реализации Стратегии развития «зеленой экономики» в Республике Таджикистан на 2023–2037 годы и выполнения поручения главы государства по превращению республики в «зеленую страну». Учитывая горный рельеф (93 % территории страны), использование автономных гибридных систем является единственной технически и экономически целесообразной альтернативой дорогостоящему строительству линий электропередачи.

2. Эффективность гибридизации. Установлено, что оптимальной архитектурой для высотных линий электропередачи в Таджикистане (например, Душанбе-Чанак, Душанбе-Кульма) является триада «фотоэлектрическая система + малая гидроэлектростанция + система хранения энергии (BESS)». Взаимное сезонное и суточное сглаживание выработки электроэнергии (пиковая солнечная энергия летом и в течение дня, стабильный поток гидроэнергии в теплое время года и поддержка учета хранения) позволяет снизить емкость батарей на 25–30 % по сравнению с чисто солнечными, изолированными электростанциями.

3. Эффективность гибридизации. Установлено, что оптимальной архитектурой для высокогорных трасс РТ (например, Душанбе — Чанак, Душанбе — Кульма) является триада «ФЭУ + Малая ГЭС + Система накопления энергии (BESS)». Взаимное сезонное и суточное сглаживание генерации (пик солнца летом и днем, стабильный гидропоток в теплый период и поддержка за счет накопителей) позволяет снизить требуемую емкость аккумуляторных батарей на 25–30 % по сравнению с чисто солнечными изолированными станциями.

4. Непрерывность исследований. Данное исследование успешно развивает концепцию использования мобильных зарядных станций. Переход к стационарным, оптимизированным гибридным комплексам позволяет обеспечить непрерывное круглогодичное обслуживание электромобилей на ключевых транспортных магистралях страны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдулло, М.А. Технико-экономический анализ применения мобильных зарядных станций для электромобилей в условиях Республики Таджикистан / М.А. Абдулло // Интеллект. Инновации. Инвестиции. — 2024. — № 5. — С. 51–63. DOI: <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2024-5-51>.
2. Ахророва, А.Д. Энергетическая безопасность зон децентрализованного энергоснабжения Республики Таджикистан / А.Д. Ахророва, М.К. Халимджанова, Х.Х. Холов // Вестник Таджикского технического университета. — 2013. — № 2(22). — С. 48–53. — EDN RIUVBH.
3. Возможности использования возобновляемых источников энергии в Таджикистане / Г.Н. Петров, Х.М. Ахмедов, К. Кабутов, Х.С. Каримов // Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. — 2009. — № 4. — С. 112–124. — EDN OYODYF.
4. Кудусов М.А. и др. Оценка потенциала солнечной и ветровой энергии в Таджикистане с использованием мультикритериального метода // Вестник Московского энергетического института. — 2024. — № 6. — С. 55–67. — URL: <https://vestnik.mpei.ru/index.php/vestnik/article/view/1198>.

5. Сироджев Б. Развитие электроэнергетики Таджикистана. — Душанбе: Ирфон, 1984. — 112 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001205638>.
6. Норматов И.Ш., Петров Г.Н. Экономические вопросы развития гидроэнергетики Таджикистана / Академия наук Республики Таджикистан, Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии. Душанбе: Республиканский Пресс-Центр, 2007, 60 с.
7. Чоршанбиев, С.Р. Анализ выработки, передачи и потребления электрической энергии в национальной энергетической компании ОАХК «Барки Точик» Республики Таджикистан / С.Р. Чоршанбиев, Г.В. Шведов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. — 2018. — № 4(44). — С. 27–35. — EDN ZCKLOR.
8. Ахророва, А.Д. Электрические потери в сетях и их влияние на энергетическую безопасность / А.Д. Ахророва, М.К. Халимджанова // Вестник Таджикского технического университета. — 2012. — № 4(20). — С. 67–72. — EDN PWBXPN.
9. Аламшоева, М.М. Современное состояние и моделирования перспективы развития электроэнергетики Таджикистана / М.М. Аламшоева // Вестник Таджикского национального университета. Серия социально-экономических и общественных наук. — 2018. — № 5. — С. 182–187. — EDN VAASOZ.
10. Томберг, И. Энергетическая политика и энергетические проекты в Центральной Евразии / И. Томберг // Центральная Азия и Кавказ. — 2007. — № 6(54). — С. 42–56. — EDN PWGJ CZ.
11. Темуров, У. Энергетическая политика Республики Таджикистан / У. Темуров // Богатство финно-угорских народов: Материалы V Международного финно-угорского студенческого форума, Йошкар-Ола, 24–26 мая 2018 года. Том Выпуск 5. — Йошкар-Ола: Марийский государственный университет, 2018. — С. 506–508. — EDN XZSHNZ.

Abdullo Mamadamon Abdurahmonbek

Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan
E-mail: mamadamonabdullo@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6253-5946>

Sa'dullozoda Shahriyor Sadullo

University of Innovation and Digital Technologies of Tajikistan, Kulyab, Republic of Tajikistan
Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan
E-mail: srsaidaliev@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5801-9140>

Optimization of charging power systems in mountainous areas of the Republic of Tajikistan using hybrid renewable energy sources

Abstract. The rapid expansion of the electric vehicle fleet in the Republic of Tajikistan has highlighted the need to develop a reliable charging infrastructure capable of stable operation away from centralized power grids. The country's mountainous terrain, where elevated terrain accounts for approximately 93 % of the country's territory, greatly complicates connecting stations to main power lines and necessitates the development of autonomous solutions. This study explores ways to improve the efficiency of charging power systems by integrating hybrid renewable energy sources, including small hydroelectric power plants, solar photovoltaic systems, and energy storage systems. The analysis identified a number of factors that distinguish mountainous areas from flat areas. Among these are extreme temperature fluctuations, the seasonal dependence of hydroelectric power generation, limited grid capacity, and the inaccessibility of populated areas. Winter power shortages exceed one billion kilowatt-hours annually, while losses in the power system reach a fifth of annual output. Given such severe constraints, relying solely on centralized power supply is deemed impractical. However, the republic boasts impressive solar potential, estimated at approximately 25 billion kilowatt-hours annually, and the construction of over nine hundred small hydroelectric power plants on mountain river tributaries is technically feasible. The practical value of the proposed solutions is determined by the feasibility of implementing the State Program for the Development of Electric Transport for 2023–2028 and the Green Economy Strategy through 2037. The findings are applicable to the design of charging nodes on high-altitude routes, including the Dushanbe-Chanak and Dushanbe-Kulma routes, and provide a methodological foundation for further research in the field of decentralized energy.

Keywords: charging energy complexes; mountainous regions; Republic of Tajikistan; optimization; renewable energy sources; small hydropower plants; solar energy; energy storage systems; electric transport; microgrid