

## ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГИБРИДНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МУРГАБСКОГО РАЙОНА РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН

Р.Х. Диёрзода, Б.Н. Шарифов, Ф.Н. Кувватов

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

В статье представлены результаты комплексного исследования и оптимизации режимов электропотребления в изолированной гибридной энергосистеме Мургабского района Горно-Бадахшанской автономной области (ГБАО) Республики Таджикистан. Актуальность работы обусловлена экстремальными природно-климатическими условиями региона (высота 3600–3800 м над уровнем моря, температура зимой до  $-50^{\circ}\text{C}$ ), ограниченностью установленной мощности базовых генерирующих источников и выраженной сезонной неравномерностью электропотребления. На основе фактических эксплуатационных данных компании «Помир Энерджи» за период 2021–2024 гг. выполнен анализ режимных характеристик энергосистемы, включающей малые гидроэлектростанции (МГЭС), солнечные (СЭС) и ветровые (ВЭС) электростанции, дизель-генераторные установки (ДГУ) и аккумуляторные системы накопления энергии (АКБ). Установлено, что в зимний период дефицит генерирующей мощности достигает 30–40% от потребности, что требует оптимизации структуры покрытия нагрузки. Разработана математическая модель оптимизации энергетического баланса на основе системы линейных алгебраических уравнений с целевой функцией минимизации суммарных затрат при соблюдении технологических ограничений. Выполнена количественная оценка эффективности интеграции ВИЭ и систем накопления, показавшая возможность снижения доли дизельной генерации в зимний период на 1–5% и повышения надежности электроснабжения. Научная новизна заключается в адаптации методов оптимизации к специфическим условиям высокогорной изолированной энергосистемы с учетом почасовых ограничений генерации и сезонной неравномерности нагрузки.

**Ключевые слова:** оптимизация, электропотребление, гибридная энергосистема, возобновляемые источники энергии, малые гидроэлектростанции, солнечные электростанции, ветроэлектростанции, дизель-генераторные установки, математическое моделирование, энергетический баланс.

## ОПТИМАЛГАРДОНИИ РЕҶАҲОИ КОРИИ СИСТЕМАИ ГИБРИДИИ ЭНЕРГЕТИКИИ НОҲИЯИ МУРҒОБИ ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН

Р.Ҳ. Диёрзода, Б.Н. Шарифов, Ф.Н. Қувватов

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар мақола натиҷаҳои таҳқиқоти ҳамаҷониба ва оптималӣ намудани реҷаҳои истеъмоли нерӯи барқ дар системаи энергетикӣи ҷудогонаи гибридии ноҳияи Мурғоби Вилояти Мухтори Кӯҳистони Бадахшон (ВМКБ)-и Ҷумҳурии Тоҷикистон пешниҳод шудаанд. Аҳамияти таҳқиқот ба шароити табинои иқлимии шади миғма (баландӣ 3600–3800 м аз сатҳи баҳр, паст шудани ҳарорати зимистон то  $-50^{\circ}\text{C}$ ), иқтидори маҳдуди насбшудаи манбаъҳои тавлидкунандаи сарборӣ ва нобаробарии мавсимии истеъмоли нерӯи барқ вобаста аст. Дар асоси маълумоти воқеии фаъолияти ширкати Pomir Energy барои давраи солҳои 2021–2024, таҳлили хусусиятҳои речаи системаи энергетикӣ, аз ҷумла нерӯгоҳҳои барқи обии хурд, нерӯгоҳҳои барқи офтобӣ ва нерӯгоҳҳои барқи бодӣ, маҷмӯи генераторҳои дизелӣ ва системаҳои нигоҳдории энергияи анҷом дода шуд. Муайян карда шуд, ки дар зимистон норасоии иқтидори тавлидкунанда ба 30–40% мерасад, ки ин оптималгардонии сохтори фарогирии сарбориро талаб мекунад. Модели математикӣ барои оптималӣ намудани тавозуни энергетикӣ дар асоси системаи муодилаҳои ҳаттии алгебравӣ бо функсияи объективии кам кардани хароҷоти умумӣ ҳангоми риояи маҳдудиятҳои технологӣ таҳия карда шуд. Арзёбии микдории самаранокӣи ҳамгироии манбаъҳои барқароршавандаи энергия ва системаҳои нигоҳдорӣ гузаронида шуд, ки имкони коҳиш додани ҳиссаи истеҳсоли сӯзишвории дизелӣ дар зимистонро то 1–5% ва беҳтар кардани эътимоднокии таъминоти барқро нишон дод. Навовариҳои илмӣ дар мубокиқ кардани усулҳои беҳсозӣ ба шароити мушаххаси системаи энергетикӣи баландкӯҳ ва ҷудогона ба назардошти маҳдудиятҳои истеҳсоли соатбайъ ва нобаробарии мавсимии бор мебошад.

**Калидвожаҳо:** оптималгардонӣ, истеъмоли нерӯи барқ, системаи гибридии нерӯи барқ, манбаъҳои энергияи барқароршаванда, нерӯгоҳҳои хурди барқи обӣ, нерӯгоҳҳои барқи офтобӣ, нерӯгоҳҳои барқи бодӣ, маҷмӯи генераторҳои дизелӣ, моделсозии математикӣ, тавозуни энергия.

## OPTIMIZATION OF OPERATING MODES OF THE HYBRID ENERGY SYSTEM OF THE MURGHOB DISTRICT OF THE REPUBLIC OF TAJIKISTAN

R. Kh. Diyorzoda, B. N. Sharifov, F. N. Quvvatov

Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

The article presents the results of a comprehensive study and optimization of power consumption modes in an isolated hybrid power system of the Murghab district of the Gorno-Badakhshan Autonomous Region (GBAO) of the Republic of Tajikistan. The relevance of the study is due to the extreme natural and climatic conditions of the region (altitude 3600–3800 m above sea level, winter temperatures down to  $-50^{\circ}\text{C}$ ), limited installed capacity of base-load generating sources and pronounced seasonal unevenness of power consumption. Based on actual operating data of Pomir Energy for the period 2021–2024, an analysis of the

mode characteristics of the power system, including small hydroelectric power plants (SHPPs), solar power plants (SPPs) and wind power plants (WPPs), diesel generator sets (DGS) and battery energy storage systems (BES). It was found that in winter, the generating capacity deficit reaches 30-40% of the need, which requires optimization of the load coverage structure. A mathematical model for energy balance optimization was developed based on a system of linear algebraic equations with an objective function of minimizing total costs while observing technological constraints. A quantitative assessment of the efficiency of integrating renewable energy sources and storage systems was conducted, demonstrating the feasibility of reducing the share of diesel generation in winter by 1-5% and improving power supply reliability. The scientific innovation lies in adapting optimization methods to the specific conditions of a high-altitude, isolated power system, taking into account hourly generation constraints and seasonal load unevenness.

**Keywords:** optimization, power consumption, hybrid power system, renewable energy sources, small hydroelectric power plants, solar power plants, wind power plants, diesel generator sets, mathematical modeling, energy balance.

## Введение

Мургабский район расположен в восточной части Горно-Бадахшанской автономной области Республики Таджикистан и является одним из наиболее труднодоступных и высокогорных населенных регионов мира. Административный центр – поселок Мургаб – находится на высоте 3600 – 3800 метров над уровнем моря, что обуславливает экстремальные климатические условия: продолжительная (до 7 месяцев) холодная зима со среднесуточными температурами  $-15...-20^{\circ}\text{C}$  и кратковременное прохладное лето.

Энергоснабжение потребителей Мургабского района осуществляется в условиях полной изоляции от централизованной энергосистемы Таджикистана. Ответственность за обеспечение электроэнергией несет компания «Помир Энержи», созданная в 2002 году как государственно-частное партнерство и обеспечивающая на сегодняшний день электроснабжение 98% потребителей ГБАО. До 2020 года основу энергосистемы Мургаба составляла малая гидроэлектростанция «Таджикистан» (бывшая Аксу) с установленной мощностью 1,5 МВт, которая не могла полностью покрыть потребности региона, особенно в зимний период, когда из-за низких температур и ледостава выработка гидроэлектростанции снижается, а потребление возрастает в связи с использованием электроотопления и ярко выраженная сезонная и суточная неравномерность электрической нагрузки. Зимой потребление электроэнергии возрастает из-за необходимости отопления, освещения и работы электронагревательных приборов, в то время как выработка гидроэлектростанций снижается вследствие уменьшения приточности и ледостава. Летом, напротив, наблюдается профицит генерации.

Основой энергосистемы служат малые гидроэлектростанции, включая МГЭС Таджикистан, обеспечивающие базовую генерацию. Ввиду климатических особенностей региона, характеризующихся высоким уровнем солнечной радиации и значительным ветровым потенциалом, в состав системы также входят солнечные электростанции.

В последние годы в регионе реализованы масштабные проекты по развитию ВИЭ. В 2020 году введена в эксплуатацию солнечная электростанция мощностью 220 кВт с гибридной аккумулирующей системой емкостью 180 кВт·ч – самая высокогорная в мире. В 2023 году в СЭС была увеличена до 800 кВт, а емкость аккумуляторных батарей — до 1,2 МВт·ч. Кроме того, в 2025 году завершили строительство трех солнечных электростанций в селах Аличур (2,8 МВт), Гульзор (450 кВт) и Булункуль (565 кВт) с суммарной емкостью накопителей около 2 МВт·ч, на данный момент не подключены к локальной энергосистеме Мургабского района [1].

В качестве резервного и регулирующего источника используются дизель-генераторные установки, а для сглаживания пиков нагрузки и накопления избыточной энергии — аккумуляторные батареи [9].

Себестоимость электроэнергии от различных источников существенно различается: гидрогенерация и СЭС имеют минимальные эксплуатационные затраты, тогда как дизельная генерация требует дорогостоящего привозного топлива, доставка которого в высокогорные условия крайне затруднена.

Перебои в энергоснабжении в условиях суровой зимы создают прямую угрозу жизнеобеспечению населения и функционированию социальных объектов.

## Постановка задачи

Целью настоящей работы является разработка и обоснование методов оптимизации режимов электропотребления в гибридной энергосистеме Мургабского района, обеспечивающих

минимизацию затрат потребителей при гарантированном покрытии нагрузки и максимальном использовании потенциала ВИЭ.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Анализ многолетней динамики выработки электроэнергии различными источниками генерации на основе эксплуатационных данных за 2021–2024 гг.
2. Выявление закономерностей сезонной и суточной неравномерности энергопотребления.
3. Разработка математической модели оптимизации энергетического баланса с учетом почасовых ограничений.
4. Численная реализация модели и оценка эффективности предлагаемых решений.
5. Обоснование технико-экономической целесообразности применения систем накопления энергии для сглаживания пиковых нагрузок.

Гибридная энергосистема Мургабского района представляет собой сложный технологический комплекс, включающий разнородные источники генерации и накопители энергии. По состоянию на начало 2025 года структура установленных мощностей характеризуется следующими параметрами (таблица 1).

Таблица 1- Состав генерирующих мощностей и систем накопления в Мургабском районе

Table 1 – Generation mix and energy storage systems in the Murghab district

| №  | Тип источника                 | Установленная мощность | Год ввода          | Примечание                |
|----|-------------------------------|------------------------|--------------------|---------------------------|
|    | МГЭС «Таджикистан» (Аксу)     | 1,5 МВт                | реконструкция 2018 | Базовая генерация         |
|    | СЭС-220 (первая очередь)      | 220 кВт                | 2020               | С АКБ 180 кВт·ч           |
|    | СЭС-600 (вторая очередь)      | 600 кВт                | 2023               | С АКБ 1,2 МВт·ч           |
|    | СЭС Аличур                    | 2,8 МВт                | 2025 (ввод)        | С АКБ 1,4 МВт·ч           |
|    | СЭС Булункуль                 | 565 кВт                | 2025 (ввод)        | С АКБ 360 кВт·ч           |
|    | СЭС Гульзор                   | 450 кВт                | 2025 (ввод)        | С АКБ 220 кВт·ч           |
|    | Октал                         | 190 кВт                | 2025 (ввод)        | С АКБ 130 кВт·ч           |
|    | Карасу                        | 95 кВт                 | 2025 (ввод)        | С АКБ 30 кВт·ч            |
|    | Дизель-генераторные установки | ~0,8 МВт (суммарно)    | —                  | Резервный источник        |
| 8. | Ветроэнергетические установки | 0,15 МВт               | —                  | Экспериментальные образцы |

Как следует из представленных данных, в период 2020–2025 гг. произошло многократное увеличение доли солнечной генерации в энергосистеме Мургабского района. Если до 2020 года единственным источником электроэнергии являлась МГЭС, то к 2025 году суммарная мощность СЭС достигнет 4,92 МВт, что более чем в 3 раза превышает мощность гидрогенерации. Это создает принципиально новые возможности для покрытия нагрузки, но одновременно порождает проблему управления разнородными источниками в условиях их стохастической генерации [1-2, 10].

Эффективность функционирования возобновляемых источников энергии в условиях Мургабского района определяется комплексом природно-климатических факторов:

**Солнечная радиация.** Таджикистан расположен в поясе между 36°40' и 41°05' северной широты, который метеорологи называют «золотым поясом» солнечного сияния. Продолжительность солнечного сияния в стране составляет 2100–3166 часов в год, а количество солнечных дней достигает 260–300. Высокогорное расположение Мургаба обуславливает повышенную интенсивность солнечной радиации вследствие меньшей толщины атмосферного слоя и высокой прозрачности воздуха. Расчетный потенциал солнечной энергетики Таджикистана оценивается в 25 млрд кВт·ч в год.

**Температурный режим.** Среднегодовая температура в Мургабе отрицательная, зимой температура опускается до  $-20...-53^{\circ}\text{C}$ . Низкие температуры оказывают двойное влияние на работу СЭС: с одной стороны, снижается температура фотоэлементов, что повышает их КПД, с другой — возможны потери из-за снежного покрова и обледенения.

**Ветровой режим.** Территория Мургабского района характеризуется значительными ветровыми нагрузками, особенно в осенне-зимний период, что создает предпосылки для эффективного использования ветроэнергетических установок.

**Гидрологический режим.** Реки Мургабского района относятся к ледниково-снеговому типу питания, что обуславливает минимальный сток в зимние месяцы (декабрь-февраль) и максимальный — в июле-августе. Это приводит к снижению выработки МГЭС в период пикового потребления.

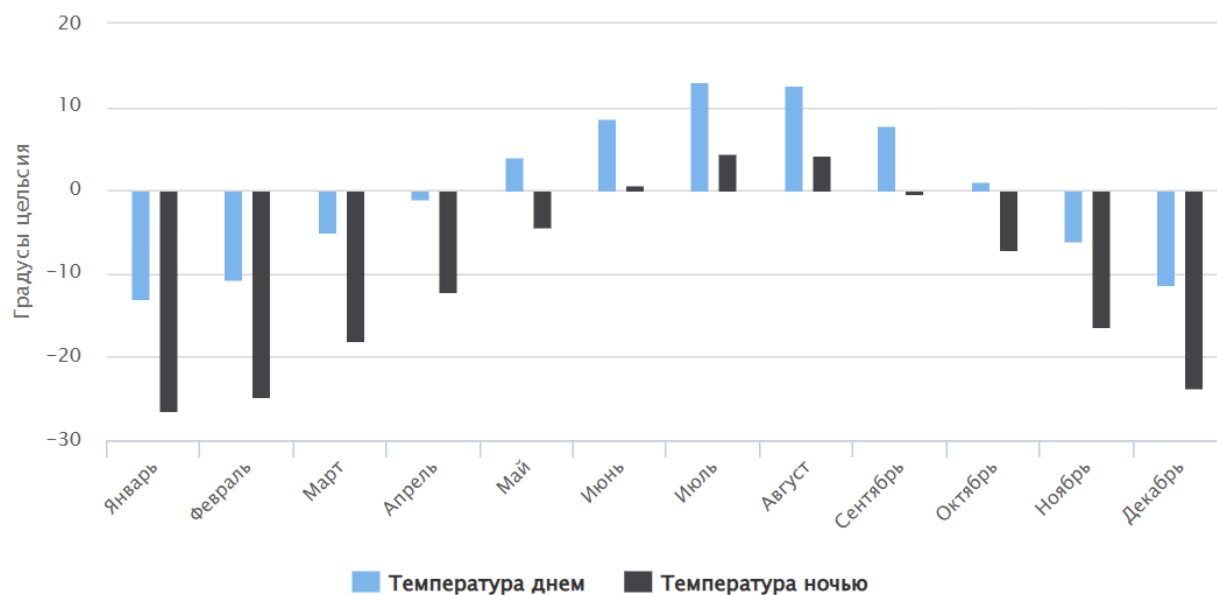


Рисунок 1- Сезонная динамика температур в Мургабском районе

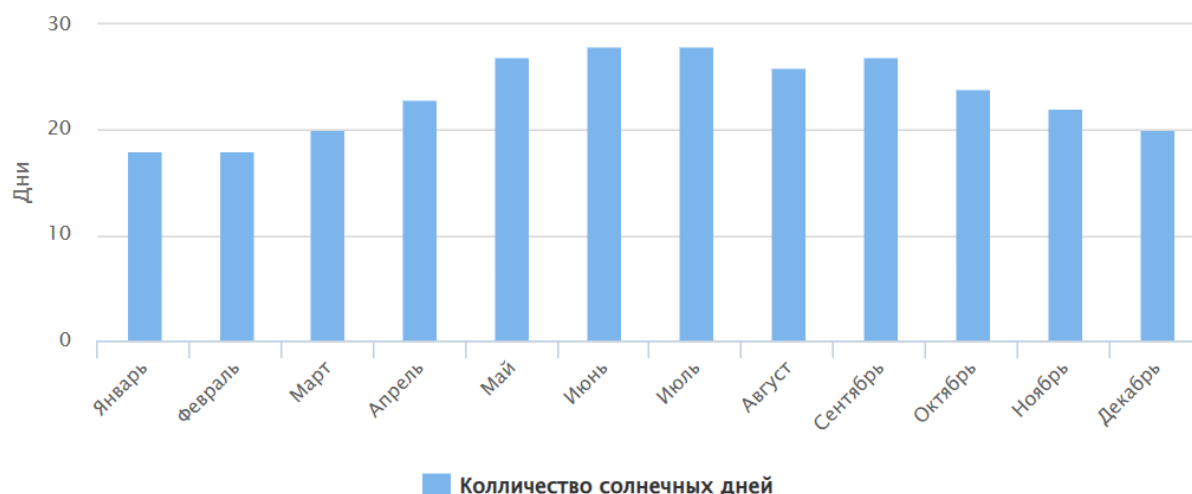


Рисунок 2- Продолжительность светового дня в Мургабском районе  
Figure 2 – Daylight duration in the Murghab district

Для количественной оценки сезонной неравномерности и эффективности работы гибридной энергосистемы был выполнен анализ месячной выработки электроэнергии за период 2021–2023 гг.

на основе данных компании «Помир Энерджи» (таблицы 1.1–1.5 исходного текста). Обобщенные результаты представлены в таблице 2 и на рисунке 3.

Таблица 2 – Сопоставление месячной выработки электроэнергии за 2021–2023 гг., тыс. кВт·ч

Table 2 – Comparison of monthly electricity generation for 2021–2023, thousand kWh

| № | Месяц    | 2021 г. | 2022 г. | 2023 г. | Среднее | Коэффициент сезонности* |
|---|----------|---------|---------|---------|---------|-------------------------|
|   | Январь   | 237,0   | 252,1   | 243,5   | 244,2   | 0,68                    |
|   | Февраль  | 225,9   | 230,5   | 234,3   | 230,2   | 0,64                    |
|   | Март     | 291,2   | 355,5   | 357,8   | 334,8   | 0,94                    |
|   | Апрель   | 396,6   | 417,5   | 427,9   | 414,0   | 1,16                    |
|   | Май      | 445,6   | 371,4   | 425,2   | 414,1   | 1,16                    |
|   | Июнь     | 383,7   | 312,9   | 361,2   | 352,6   | 0,99                    |
|   | Июль     | 347,4   | 285,1   | 294,1   | 308,9   | 0,86                    |
|   | Август   | 332,4   | 297,8   | 272,7   | 301,0   | 0,84                    |
|   | Сентябрь | 367,3   | 333,0   | 347,7   | 349,3   | 0,98                    |
|   | Октябрь  | 447,7   | 419,2   | 449,7   | 438,9   | 1,23                    |
|   | Ноябрь   | 313,1   | 337,6   | 430,8   | 360,5   | 1,01                    |
|   | Декабрь  | 264,8   | 242,7   | 351,4   | 286,3   | 0,80                    |
|   | Год      | 4052,7  | 3855,3  | 4196,4  | 4034,8  | —                       |

Примечание: коэффициент сезонности рассчитан как отношение среднемесячной выработки к среднегодовой ( $4034,8 / 12 = 336,2$  тыс. кВт·ч).

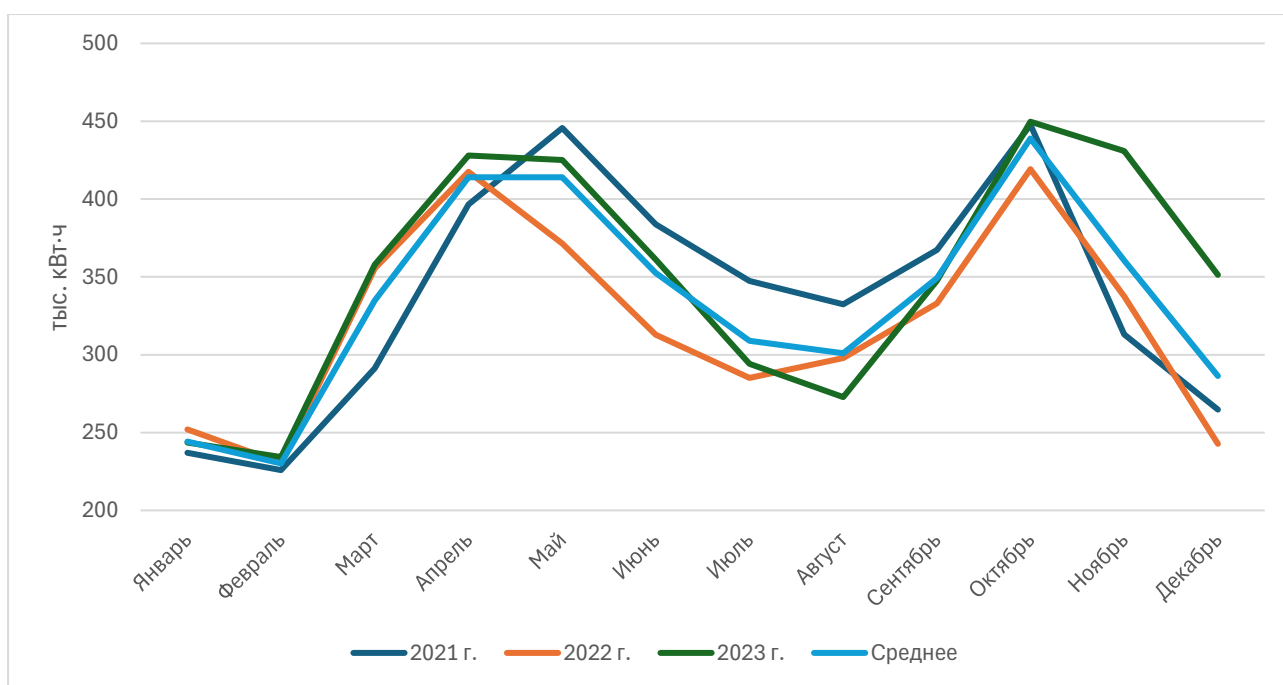


Рисунок 3 – Годовой ход суммарной выработки электроэнергии в Мургабском районе (2021–2023 гг.)

Figure 3 – Annual variation of total electricity generation in the Murghab district (2021–2023)

Анализ представленных данных позволяет сделать следующие выводы:

1. Ярко выраженная сезонность. Максимальная выработка приходится на апрель-май и октябрь (периоды высокой водности и оптимальной солнечной активности). В январе-феврале выработка снижается до 64–68% от среднемесячного уровня, что при одновременном росте потребления создает дефицит мощности.

2. Межгодовая вариабельность. В 2023 году наблюдается существенный рост выработки в ноябре-декабре по сравнению с предыдущими годами, что, вероятно, связано с вводом в

эксплуатацию СЭС-600 и систем накопления, позволивших более эффективно аккумулировать энергию в осенний период.

3. Роль солнечной генерации. По данным 2021–2023 гг., доля СЭС в общей выработке составляла около 8–9%, причем максимальный вклад (до 12%) достигался в переходные месяцы, когда гидрогенерация еще не достигла пика, а солнечная активность уже была значительной.

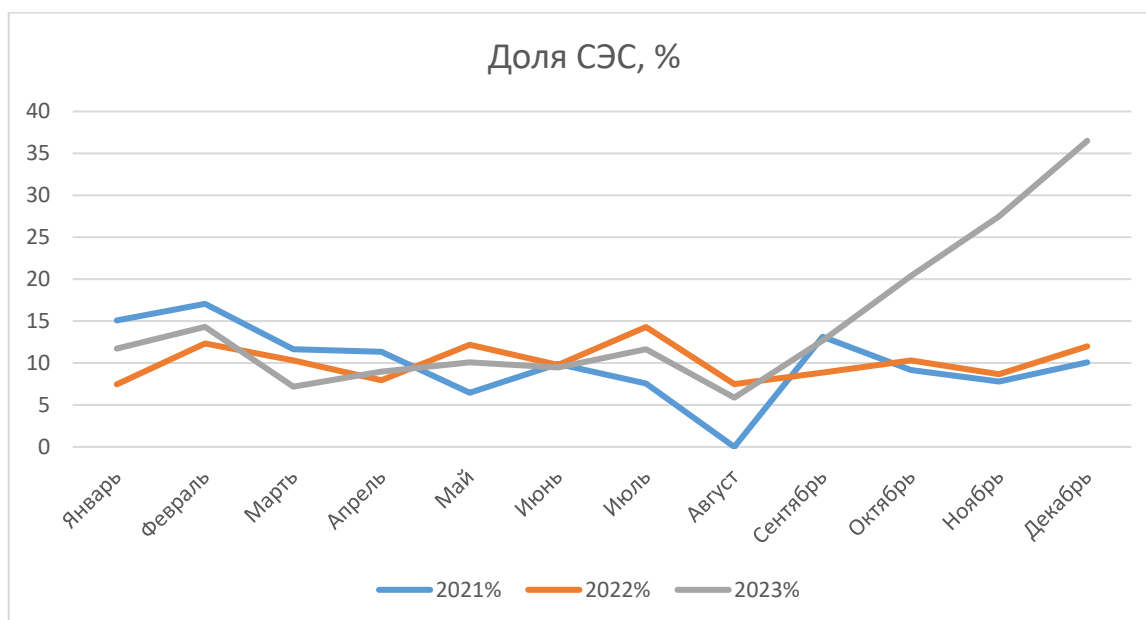


Рисунок 4 – Вклад солнечной генерации в общую выработку электроэнергии по месяцам (2021–2023 гг.)

Figure 4 – Monthly contribution of solar generation to total electricity generation (2021–2023)

Для анализа суточной неравномерности и оценки эффективности систем накопления были использованы данные почасового учета за январь и апрель 2023 г.

Обобщенный суточный график нагрузки и генерации для зимнего периода представлен на рисунках 5-6 [17].

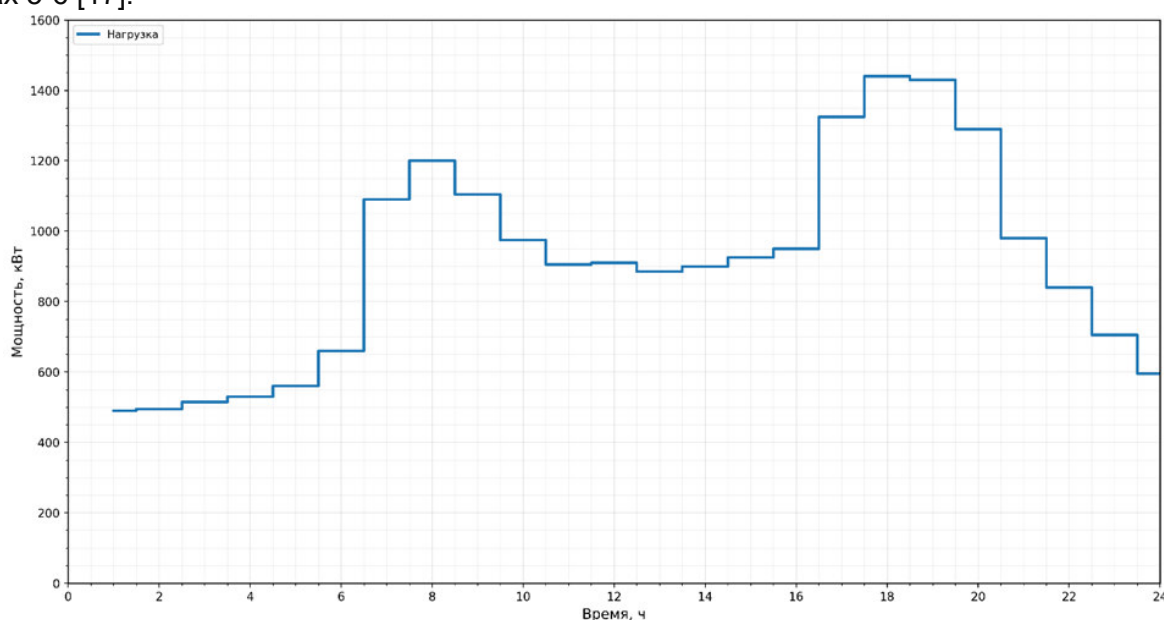


Рисунок 5-Суточный график нагрузки и генерации в зимний период

Figure 5 – Daily load and generation profile in the winter period

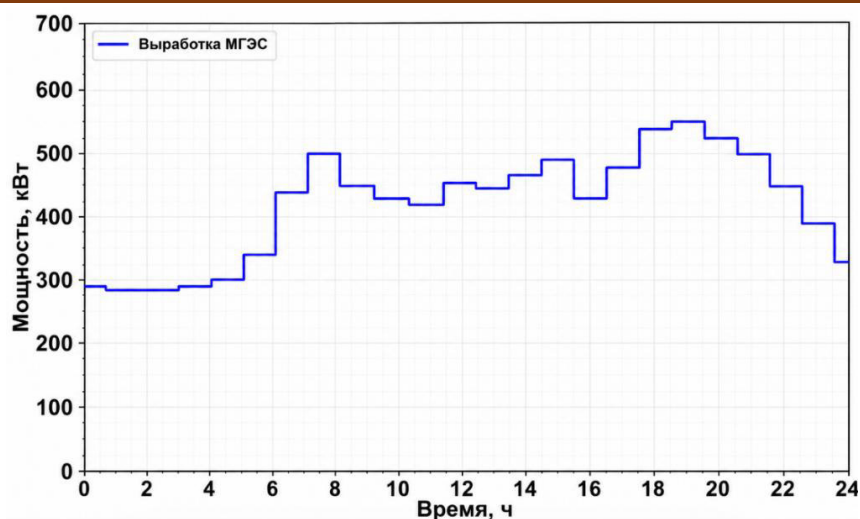


Рисунок 6- Суточный график генерации МГЭС в зимний период  
Figure 6 – Daily SHPP generation profile in the winter period

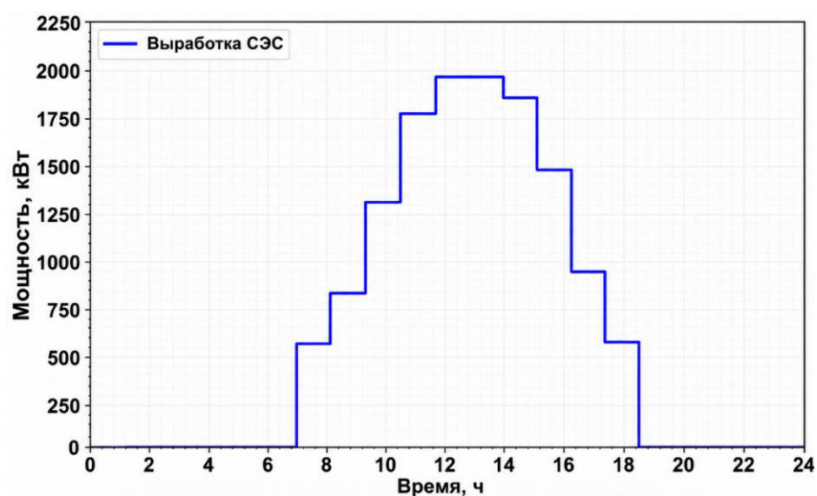


Рисунок 7- Суточный график генерации СЭС в зимний период  
Figure 7 – Daily SPP generation profile in the winter period

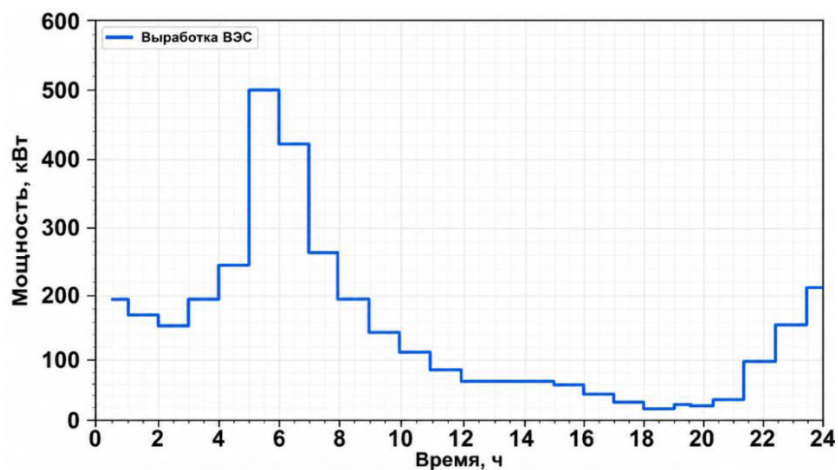


Рисунок 8 – Суточный потенциальный график генерации ВЭС в зимний период  
Figure 8 – Daily potential WPP generation profile in the winter period

Характерные особенности суточного графика в зимний период:

- Утренний пик (08:00–10:00) – включение электронагревательных приборов, освещения, приготовление пищи.
- Дневной провал (12:00–15:00) – снижение нагрузки в период максимальной солнечной активности (одновременная генерация СЭС позволяет производить заряд АКБ).
- Вечерний максимум (18:00–06:00) – максимальное потребление при отсутствии солнечной генерации, покрывается за счет разряда АКБ и, при необходимости, дизельной генерации.

Анализ данных января 2023 г. показывает, что суточная неравномерность потребления достигает 3 – 4 – кратной величины: минимальное потребление в ночные часы составляет около 1500 кВт, максимальное в вечерние часы — до 500–600 кВт. При этом выработка СЭС, достигающая в дневные часы 2000 кВт (суммарно по двум очередям), позволяет существенно снизить нагрузку на гидроэлектростанцию и накопить энергию в АКБ для вечернего пика.

Задача оптимизации режимов электропотребления в гибридной энергосистеме Мургабского района формулируется следующим образом: при известных суточных графиках нагрузки потребителей  $P_{\Pi}(t)$  и прогнозируемой выработке возобновляемых источников  $P_{СЭС}(t)$ ,  $P_{ВЭС}(t)$ ,  $P_{МГЭС}(t)$  определить такие значения мощностей, отбираемых от каждого источника  $P_j(t)$ , режимы работы аккумуляторных батарей  $P_{АКК}(t)$ , чтобы суммарные затраты на электроэнергию за расчетный период (сутки) были минимальны при обязательном выполнении балансовых соотношений и технологических ограничений [10-15].

### Математическая модель

Основное уравнение энергетического баланса для каждого часа  $t$  имеет вид:

$$P_{СИС}(t) + P_{МГЭС}(t) + P_{СЭС}(t) + P_{ВЭС}(t) + P_{Диз}(t) \pm P_{АКК}(t) = P_{\Pi}(t) + \Delta P(t) \quad (1)$$

где знак «+» перед  $P_{АКК}(t)$  соответствует разряду аккумуляторной батареи (отдача энергии в сеть), знак «-» – заряду (потребление энергии из сети).

В интегральной форме для суточного интервала:

$$\begin{aligned} \int_0^{24} P_{СИС}(t)dt + \int_0^{24} P_{МГЭС}(t)dt + \int_0^{24} P_{СЭС}(t)dt + \int_0^{24} P_{ВЭС}(t)dt + \int_0^{24} P_{Диз}(t)dt \pm \int_0^{24} P_{АКК}(t)dt \\ = \int_0^{24} P_{\Pi}(t)dt + \int_0^{24} \Delta P(t)dt \end{aligned}$$

Это дает возможность получать энергию из разных источников: энергетические системы Помир Энержи, МГЭС «Мургабского района», ветроустановки, солнечные электростанции, дизельной установки и аккумуляторы, себестоимость которых отличительна. Эффективность от их применения определяется как соотношение полученной энергии различной стоимости для каждого часа применения. Задача носит оптимизационный характер.

Примером могут служить режимы электропотребления Мургаба, для чего примем:

$P_{\Pi i}$  – потребление электроэнергии потребителями Мургабского района.

$P_{СИС i}$  – мощность передачи от энергосистемы системы Помир Энержи;

$P_{МГЭС i}$  – мощность, полученная от МГЭС Мургабского района;

$P_{СЭС i}$  – мощность, полученная от солнечных электростанций;

$P_{ВЭС i}$  – мощность, полученная от ветровых электростанций;

$P_{Диз}$  – мощность, полученная от дизельных генераторных установок;

$P_{АКК i}$  – мощность, полученная от аккумулятора.

Мощность каждого источника в каждый час ограничена техническими параметрами:

$$0 \leq P_{СЭС}(t) \leq P_{\max}^{СЭС}(t)$$

$$0 \leq P_{ВЭС}(t) \leq P_{\max}^{ВЭС}(t)$$

$$0 \leq P_{\text{Диз}}(t) \leq P_{\text{max}}^{\text{Диз}}(t)$$

$$0 \leq P_{\text{Акк}}^{\text{Разряд}}(t) \leq P_{\text{max}}^{\text{Акк}}(t); 0 \leq P_{\text{Акк}}^{\text{Заряд}}(t) \leq P_{\text{max}}^{\text{Акк}}(t)$$

Дополнительным ограничением выступает энергетический баланс аккумуляторной батареи: изменение степени заряда  $E_{\text{Акк}}(t)$  определяется разностью мощностей заряда и разряда с учетом КПД:

$$\frac{dE_{\text{Акк}}(t)}{dt} = \eta_{\text{зар}} P_{\text{зар}}(t) - \frac{1}{\eta_{\text{зар}}} P_{\text{разр}}(t)$$

$$0 \leq E_{\text{Акк}}(t) \leq E_{\text{max}}^{\text{Акк}}(t)$$

В качестве математической модели для выбора источника энергии для нормализации расходов потребителя мы воспользовались системой нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ) с возможностью ее преобразования в систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Расход электроэнергии за сутки нормируется произведением данных входного вектора производимой/передаваемой электроэнергии и матрицы цен. Ежечасное усредненное значение мощности использованной электроэнергии совпадает с расчетным значением за этот же час. Вышесказанное запишем в следующем выражении:

$$\begin{cases} C_{11} \cdot P_{\text{Сис}} + C_{12} \cdot P_{\text{МГЭС}} + C_{13} \cdot P_{\text{СЭС}} + C_{14} \cdot P_{\text{ВЭС}} + C_{15} \cdot P_{\text{Диз}} + C_{16} \cdot P_{\text{Акк}} = m_1 \\ C_{21} \cdot P_{\text{Сис}} + C_{22} \cdot P_{\text{МГЭС}} + C_{23} \cdot P_{\text{СЭС}} + C_{24} \cdot P_{\text{ВЭС}} + C_{25} \cdot P_{\text{Диз}} + C_{26} \cdot P_{\text{Акк}} = m_2 \\ C_{31} \cdot P_{\text{Сис}} + C_{32} \cdot P_{\text{МГЭС}} + C_{33} \cdot P_{\text{СЭС}} + C_{34} \cdot P_{\text{ВЭС}} + C_{35} \cdot P_{\text{Диз}} + C_{36} \cdot P_{\text{Акк}} = m_3 \\ C_{41} \cdot P_{\text{Сис}} + C_{42} \cdot P_{\text{МГЭС}} + C_{43} \cdot P_{\text{СЭС}} + C_{44} \cdot P_{\text{ВЭС}} + C_{45} \cdot P_{\text{Диз}} + C_{46} \cdot P_{\text{Акк}} = m_4 \\ C_{51} \cdot P_{\text{Сис}} + C_{52} \cdot P_{\text{МГЭС}} + C_{53} \cdot P_{\text{СЭС}} + C_{54} \cdot P_{\text{ВЭС}} + C_{55} \cdot P_{\text{Диз}} + C_{56} \cdot P_{\text{Акк}} = m_5 \\ C_{61} \cdot P_{\text{Сис}} + C_{62} \cdot P_{\text{МГЭС}} + C_{63} \cdot P_{\text{СЭС}} + C_{64} \cdot P_{\text{ВЭС}} + C_{65} \cdot P_{\text{Диз}} + C_{66} \cdot P_{\text{Акк}} = m_6 \end{cases} \quad (2)$$

где –  $m_1$  стоимость потребленной электроэнергии;

$i=1,2,3,4,5,6$  – четыре возможных источника энергии для потребителя.

Применив метод исключения Гаусса, выполняется решение СЛАУ на каждом шаге итерации. Прямым ходом требуется свести к нулю под диагональные элементы, а обратным ходом требуется решить уравнения с верхней точки треугольной матрицы. Первым ходом определяется последнее по номеру неизвестное значение.

Минимизация суммарных затрат потребителя за расчетные сутки:

$$M = \sum_{i=1}^{24} (c_{\text{Сис}} \cdot P_{\text{Сис},i} + c_{\text{МГЭС}} \cdot P_{\text{МГЭС},i} + c_{\text{СЭС}} \cdot P_{\text{СЭС},i} + c_{\text{ВЭС}} \cdot P_{\text{ВЭС},i} + c_{\text{Диз}} \cdot P_{\text{Диз},i} + c_{\text{Акк}} \cdot P_{\text{Акк}}) \cdot \Delta t$$

$$\rightarrow \min$$

$$M = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 C_{ij} \cdot P_j \cdot t \rightarrow \min,$$

где  $c_j$  – стоимость электроэнергии от  $j$ -го источника (в сомони за 1 кВт·ч);  $\Delta t=1$  час.

Стоимость электроэнергии от различных источников существенно различается. Наименьшую себестоимость имеют гидрогенерация (после завершения инвестиционной фазы) и солнечные электростанции. Наиболее высокая стоимость у дизельной генерации из-за затрат на доставку топлива. Стоимость электроэнергии от аккумуляторных батарей определяется затратами на их эксплуатацию и ресурс циклов.

Для численной реализации задача оптимизации сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) на каждом временном шаге. Вектор мощностей источников представляется в виде:

$$P = [P_{\text{Сис}}, P_{\text{МГЭС}}, P_{\text{СЭС}}, P_{\text{ВЭС}}, P_{\text{Диз}}, P_{\text{Акк}}(t)]^T \quad (3)$$

Матрица цен имеет диагональный вид:

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{pmatrix} \quad (4)$$

где  $c_{11}$  – цена электроэнергии от системы «Помир Энержи»;  $c_{12}$  – от МГЭС Мургаб;  $c_{33}$  – от СЭС;  $c_{44}$  – от ВЭУ;  $c_{55}$  – от ДГУ;  $c_{66}$  – от АКБ.

Суммарные затраты за час:

$$M(t) = C \cdot P(t) \cdot \Delta t \quad (5)$$

Результатом оптимизации энергопотребления гибридной энергосистемы Мургабского района Республики Таджикистан при получении потенциальной генерации от различных источников энергии, таких как МГЭС (рисунок 6), СЭС (рисунок 7) и ВЭС (рисунок 8), получим суммарную генерацию, представленную на рисунке 9.

Результаты оптимизации режимов электропотребления в гибридной энергосистеме Мургабского района Республики Таджикистан представлены на рисунке 9. В соответствии с принятой целевой функцией минимизации суммарных затрат на электроэнергию при соблюдении балансовых соотношений и технологических ограничений для каждого часа расчетных суток были определены рациональные значения мощности, отбираемой от МГЭС, СЭС, ВЭС, дизельной генерации и аккумуляторной батареи. Полученный суточный график показывает, что после оптимизации в дневные часы при превышении суммарной генерации над нагрузкой, аккумуляторная батарея функционирует в режиме зарядки, аккумулируя избыточную энергию, преимущественно вырабатываемую возобновляемыми источниками. В вечерние часы, характеризующиеся ростом нагрузки и снижением текущей генерации, АКБ переходит в режим разрядки, компенсируя дефицит мощности. Тем самым обеспечивается более равномерное покрытие графика нагрузки, повышение эффективности использования возобновляемых источников энергии и снижение потребности в дорогостоящей дизельной генерации.

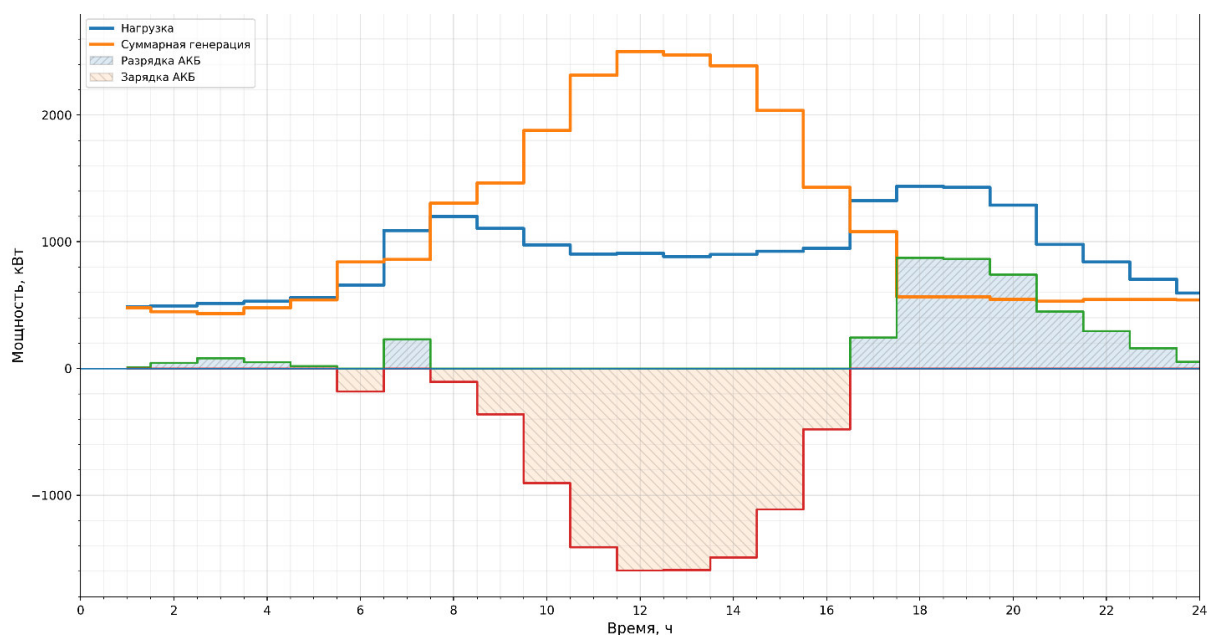


Рисунок 9 – Суточный график нагрузки  
Figure 9 – Daily load profile

Суммарная генерация и зарядка/разрядка аккумуляторной батареи Мургабского района Республики Таджикистан после оптимизации режимов работы гибридной энергосистемы.

Полученные результаты согласуются с выводами других исследователей в области оптимизации гибридных энергосистем. В работе Манусова В.З. и Назарова М.Х., [10] показано, что для автономных систем с ВИЭ оптимальное соотношение мощностей гидрогенерации, СЭС и АКБ позволяет снизить потребность в дизельном топливе до 1–5%.

Исследования Хасанзода Н. и Сафарова М.И. [8, 11] демонстрируют эффективность применения линейного программирования для задач распределения нагрузки между источниками различной стоимости. Предложенный нами матричный подход с использованием метода Гаусса является развитием этого направления.

На основе выполненного анализа можно сформулировать следующие рекомендации для оператора энергосистемы («Помир Энержи»):

1. Внедрение автоматизированной системы управления. Разработанная математическая модель может быть положена в основу SCADA-системы, автоматически выбирающей оптимальные режимы заряда-разряда АКБ и включения ДГУ в зависимости от прогноза нагрузки и генерации ВИЭ.

2. Оптимизация тарифной политики. Дифференциация тарифов по времени суток (более высокий тариф в вечерний пик, пониженный – в дневные часы) будет стимулировать потребителей переносить часть нагрузки на дневное время, когда имеется избыток солнечной генерации.

3. Развитие систем накопления. Результаты моделирования показывают, что существующая емкость АКБ используется практически полностью в зимний период. Дальнейшее увеличение емкости позволит еще больше снизить долю дизельной генерации и увеличить генерацию в национальную сеть.

## Заключение

Выполненное исследование позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Сезонная неравномерность электропотребления в Мургабском районе достигает 30–40%: в зимние месяцы выработка снижается до 64–68% от среднемесячного уровня, что при росте нагрузки создает дефицит мощности.

2. Интеграция солнечных электростанций позволила существенно повысить долю ВИЭ в энергобалансе, однако полное использование их потенциала требует оптимизации режимов работы систем накопления.

3. Разработанная математическая модель на основе балансовых уравнений и системы ограничений позволяет определять оптимальное почасовое распределение нагрузки между источниками генерации с минимизацией суммарных затрат потребителя.

4. Численное моделирование для зимнего периода показало, что оптимизация режимов позволяет снизить расход дизельного топлива на 99% и сохранить надежность электроснабжения.

5. Системы накопления энергии обеспечивают сглаживание суточного графика нагрузки, покрытие вечернего пика и повышение коэффициента использования установленной мощности ВИЭ.

Научная новизна работы заключается в адаптации методов оптимизации к специфическим условиям высокогорной изолированной энергосистемы с учетом почасовых ограничений генерации и сезонной неравномерности нагрузки.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку методов краткосрочного прогнозирования выработки ВИЭ с учетом метеорологических факторов, создание автоматизированных систем управления режимами и экономическую оценку оптимальной структуры генерирующих мощностей для перспективного развития энергосистемы Мургабского района.

*Рецензент: Абдуллоев Б.П. – к.т.н., начальник отдела международных отношений, реализации проектов и академической мобильности ИТГУК*

## Литература

1. Сайт Министерства энергетики и водных ресурсов Республики Таджикистан. – URL: <https://www.mewr.tj/?p=6668&lang=tj> (дата обращения: 20.03.2026).

2. Официальный сайт Президента Республики Таджикистан. – URL: <http://www.president.tj> (дата обращения: 20.02.2026).
3. Абдурахманов, А. Я. Возобновляемые источники энергии в Таджикистане / А. Я. Абдурахманов // Вестник Бохтарского государственного университета имени Н. Хусрава. Серия естественных наук. – 2024. – № 2-1 (120). – ISSN 2663-6417.
4. Абдурахманов, А. Я. Рушди гидроэнергетикаи хурд ва манбаҳои алтернативии ноҳияи Мурғоб / А. Я. Абдурахманов, Ф. Н. Кувватов, Д. Мустафоӣ, Ҳ. Билоли // Вестник Бохтарского государственного университета имени Носира Хусрава. Серия естественных наук. – 2024. – № 2-1 (120). – С. 27–30.
5. Махмадов, Ш. С. Моделирование режимов работы МГЭС с учётом колебаний уровня бассейна суточного регулирования / Ш. С. Махмадов, Р. Х. Диерзода, Ш. М. Султонов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2020. – № 2(50). – С. 47–53. – EDN VWPJFH.
6. Диёров, Р. Х. Ветроэнергетический потенциал ГБАО Республики Таджикистан / Р. Х. Диёров, Ш. Р. Гуламов, О. М. Сайфуллоева, Ф. К. Шарипов // Наука и инновация. Серия геологических и технических наук. – 2022. – № 3. – С. 63–70.
7. Официальный сайт исполнительного органа государственной власти ГБАО. – URL: <https://badakhshon.tj/> (дата обращения: 05.03.2026).
8. Сафаров, М. И. Оптимизация распределённой генерации в локальной электроэнергетической системе с возобновляемыми источниками энергии: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы / М. И. Сафаров. – Душанбе, 2023. – 158 с.
9. Федоров, М. П. Безуглеродная энергетика как направление развития региона Санкт-Петербург / М. П. Федоров, М. В. Кривошеев // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 10–21. – DOI: 10.18721/JEST.240201.
10. Манусов, В. З. Оптимизация режимов электропотребления автономной системы с ВИЭ / В. З. Манусов, М. Х. Назаров // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24, № 4. – С. 810–820. – DOI: 10.21285/1814-3520-2020-4-810-820.
11. Хасанзода, Н. Оптимизация режимов электропотребления в интеллектуальных сетях с двусторонним потоком энергии методами искусственного интеллекта: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Н. Хасанзода. – Новосибирск, 2019. – 187 с.
12. Лаврик, А. Ю. Выбор состава ветро-солнечной электростанции с дизельными генераторами / А. Ю. Лаврик, Ю. Л. Жуковский, А. Д. Булдыско // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 10–17. – DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-10-17.
13. Карамов, Д. Н. Математическое моделирование автономной системы электроснабжения с ВИЭ / Д. Н. Карамов // Вестник ИрГТУ. – 2015. – № 9 (104). – С. 133–140.
14. Национальное информационное агентство Таджикистана «Ховар». – URL: <https://khovar.tj/rus/2020/11/v-tadzhikistane-zarabotala-samaya-vysokaya-v-mire-solnechnaya-elektrostantsiya/> (дата обращения: 02.02.2026).
15. Лоихаи нерӯҳои барқи офтобии Мурғоб / ОАО «Помир Энерджи». – Душанбе, 2024.
16. Погода в Мургабе по месяцам // 365 по Цельсию. – URL: [https://pogoda.365c.ru/tajikistan/murgob/po\\_mesyacam](https://pogoda.365c.ru/tajikistan/murgob/po_mesyacam) (дата обращения: 10.01.2026).
17. Махмадов, Ш. С. Моделирование режимов работы МГЭС с учётом колебаний уровня бассейна суточного регулирования / Ш. С. Махмадов, Р. Х. Диерзода, Ш. М. Султонов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2020. – № 2(50). – С. 47–53. – EDN VWPJFH.

## Reference

1. Website of the Ministry of Energy and Water Resources of the Republic of Tajikistan. URL: <https://www.mewr.tj/?p=6668&lang=tj> (accessed: March 20, 2026).
2. Official website of the President of the Republic of Tajikistan. URL: <http://www.president.tj> (accessed: February 20, 2026).
3. Abdurakhmanov, A. Ya. Renewable Energy Sources in Tajikistan / A. Ya. Abdurakhmanov // Bulletin of Bokhtar State University named after N. Khusrav. Natural Sciences Series. - 2024. - No. 2-1 (120). - ISSN 2663-6417.
4. Abdurakhmanov, A. Ya. Alternative approaches to hydropower engineering / A. Ya. Abdurakhmanov, F. N. Kuvvatov, D. Mustafoi, H. Biloli // Bulletin of Bokhtar State University named after Nosir Khusrav. Series of natural sciences. - 2024. - No. 2-1 (120). - P. 27-30.
5. Makhmadov, Sh. S. Modeling of operating modes of small hydroelectric power plants taking into account fluctuations in the level of the daily regulation basin / Sh. S. Makhmadov, R. Kh. Diyerzoda, Sh. M. Sultonov // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. – 2020. – №2(50). – P. 47–53. – EDN VWPJFH.

6. Diyorov, R. Kh. Wind energy potential of GBAO of the Republic of Tajikistan / R. Kh. Diyorov, Sh. R. Gulamov, O. M. Saifulloeva, F. K. Sharipov // Science and Innovation. Series of geological and technical sciences. – 2022. – №3. – P. 63–70.
7. Official website of the executive body of state power of GBAO. – URL: <https://badakhshon.tj/> (date of access: 05.03.2026).
8. Safarov, M. I. Optimization of distributed generation in a local electric power system with renewable energy sources: dis. ... cand. tech. sciences: 05.14.01 – Energy systems and complexes / M. I. Safarov. – Dushanbe, 2023. – 158 p.
9. Fedorov, M. P. Carbon-free energy as a direction for development of the St. Petersburg region / M. P. Fedorov, M. V. Krivosheev // Scientific and technical statements of SPbPU. Natural and engineering sciences. – 2018. – Vol. 24, No. 2. – Pp. 10–21. – DOI: 10.18721/JEST.240201.
10. Manusov, V. Z. Optimization of power consumption modes of an autonomous system with renewable energy sources / V. Z. Manusov, M. Kh. Nazarov // Bulletin of Irkutsk State Technical University. – 2020. – Vol. 24, No. 4. – P. 810–820. – DOI: 10.21285/1814-3520-2020-4-810-820.
11. Hasanzoda, N. Optimization of power consumption modes in smart grids with two-way energy flow using artificial intelligence methods: dis. ... Cand. of Engineering Sciences: 05.14.02 / N. Hasanzoda. – Novosibirsk, 2019. – 187 p.
12. Lavrik, A. Yu. Selection of the composition of a wind-solar power plant with diesel generators / A. Yu. Lavrik, Yu. L. Zhukovsky, A. D. Buldysko // News of universities. Problems of energy. – 2020. – Vol. 22, No. 1. – P. 10–17. – DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-10-17.
13. Karamov, D. N. Mathematical modeling of an autonomous power supply system with renewable energy sources / D. N. Karamov // Bulletin of IrSTU. – 2015. – No. 9 (104). – P. 133–140.
14. National Information Agency of Tajikistan "Khovar". – URL: <https://khovar.tj/rus/2020/11/v-tadzhikistane-zarabotala-samaya-vysokaya-v-mire-solnechnaya-elektrostantsiya/> (date of access: 02.02.2026).
15. Weather forecast for Murghab / JSC "Pomir Energy". – Dushanbe, 2024.
16. Weather in Murghab by month // 365 degrees Celsius. – URL: [https://pogoda.365c.ru/tajikistan/murghob/po\\_mesyacam](https://pogoda.365c.ru/tajikistan/murghob/po_mesyacam) (date of access: 10.01.2026).
17. Makhmadov, Sh. S. Modeling of operating modes of small hydroelectric power plants taking into account fluctuations in the level of the daily regulation basin / Sh. S. Makhmadov, R. Kh. Dierzoda, Sh. M. Sultanov // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. – 2020. – No. 2 (50). – P. 47–53. – EDN VWPJFH.

#### МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН-СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ-INFORMATION ABOUT AUTHORS

| TJ                                                                                                                                                                    | RU                                                                  | EN                                                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Диёрзода Рустам Ҳакималӣ                                                                                                                                              | Диёрзода Рустам Хакимали                                            | Diyorzoda Rustam Khakimali                                       |
| Донишгоҳ техникии Тоҷикистон<br>ба номи академик М.С. Осимӣ                                                                                                           | Таджикский технический<br>университет<br>имени академика М.С. Осими | Tajik Technical University named<br>after<br>academic M.S. Osimi |
| н.и.т., дотсент                                                                                                                                                       | к.т.н., доцент                                                      | Candidate of Technical Sciences                                  |
| E-mail: <a href="mailto:diyorzoda@gmail.com">diyorzoda@gmail.com</a><br><a href="https://orcid.org/0000-0001-8513-9404">https://orcid.org/0000-0001-8513-9404</a>     |                                                                     |                                                                  |
| TJ                                                                                                                                                                    | RU                                                                  | EN                                                               |
| Шарифов Бохирдҷон<br>Насруллоевӣ                                                                                                                                      | Шарифов Бохирдҷон<br>Насруллоевӣ                                    | Sharifov Bohirjon Nasrulloevich                                  |
| Донишгоҳ техникии Тоҷикистон<br>ба номи академик М.С. Осимӣ                                                                                                           | Таджикский технический<br>университет<br>имени академика М.С. Осими | Tajik Technical University named<br>after<br>academic M.S. Osimi |
| н.и.т., муалими калон                                                                                                                                                 | к.т.н., старший преподаватель                                       | Candidate of Technical Sciences<br>senior lecturer               |
| E-mail: <a href="mailto:energetik_tty@mail.ru">energetik_tty@mail.ru</a><br><a href="https://orcid.org/0000-0003-1998-8306">https://orcid.org/0000-0003-1998-8306</a> |                                                                     |                                                                  |
| TJ                                                                                                                                                                    | RU                                                                  | EN                                                               |
| Кувватов Фарух Назриалоевич                                                                                                                                           | Кувватов Фарух Назриалоевич                                         | Khuvatov Farukh Nazrialoevich                                    |
| Донишқадаи Энергетикии<br>Тоҷикистон                                                                                                                                  | Институт энергетики<br>Таджикистана                                 | Institute of Energy Tajikistan                                   |
| ассистент                                                                                                                                                             | ассистент                                                           | assistant                                                        |
| E-mail: <a href="mailto:farukh.kuvatov@bk.ru">farukh.kuvatov@bk.ru</a>                                                                                                |                                                                     |                                                                  |