



Shamol va gidroenergetika o'zaro ta'sir: mavsumiy o'zgarishlarda kompensatsiya potentsiali

Romen A. Zahidov¹, Jaxongir X. Mamadaliyev²

¹) DSc, akademik. O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Energetika muammolari instituti, Toshkent, 100204, O'zbekiston; energetika@academy.uz <https://orcid.org/0009-0001-4638-1043>

²) doktorant. Namangan muhandislik-texnologiya instituti, Namangan, 160115, O'zbekiston; mamadaliyevjahongir@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0004-1439-1468>

Dolzarblik: so'nggi o'n yillikda qayta tiklanadigan energiya manbalari (QTM) jahon energetika siyosatida tobora muhim ahamiyat kasb etmoqda. Energiya talabining oshishi, tabiiy resurslarning kamayishi va iqlim o'zgarishi an'anaviy energiya manbalaridan barqaror yechimlarga o'tishni talab qiladi. Shu nuqtayi nazardan, Markaziy Osiyo va xususan O'zbekiston cheklangan suv resurslari va elektr energiyasiga bo'lgan talabning ortishi sababli turli hil muammolarga duch kelmoqda. O'zbekistonning energetika tizimi uzoq yillar davomida qazilma yoqilg'ilar va gidroelektr stansiyalarga bog'liq bo'lib kelgan, biroq qazilma yoqilg'isining kamayib borishi va iqlim o'zgarishi suv resurslarining barqaror ta'minlanishining buzilishiga olib kelmoqda, bu esa gidroenergetika barqarorligiga bevosita ta'sir ko'rsatadi. Sug'orishi mavsumlari va iqlim anomaliyalari sharoitida kichik GESlarning quvvati aholi va sanoat ehtiyojlarini qondirish uchun yetarli bo'lmay qolishi mumkin. Izlanishlarda mintaqaning iqlim sharoitlarida shamol energetikasi barqaror potensial imkoniyati va suv resurslari kamaygan davrlarda doimiy elektr energiyasi ishlab chiqarishni ta'minlay oladi imkoniyatini ko'rib chiqilgan. Kichik GES va shamol elektr stansiyalarining (SHES) bigalikda qo'llanilishi ayniqsa suv resurslari ta'minoti barqaror bo'lmagan sharoitda barqaror energiya bilan ta'minlashga yordam berishi extimolligi yuqori. Bu yondashuv nafaqat tabiiy omillarga bog'liqlikni kamaytiradi, balki uglerod gazini qisqartirishga ham xizmat qiladi, bu esa barqaror rivojlanish maqsadlariga mos keladi va QTEM potensialidan samarali foydalanish imkonini beradi.

Maqsad: O'zbekistondagi kichik GESlarning holati va potensialini o'rganish, shuningdek, ularning mavsumiy ishlab chiqarish tebranishlarini SHES orqali qoplash imkoniyatlarini tadqiq qilish. Shamol energiyasining integratsiya afzalliklari yaqqol ko'rinib turibdi ayniqsa yoz oylarida, suv resurslari kamayganda, gidroenergetikaga barqaror qo'shimcha manba bo'lib xizmat qilishi mumkin. Ushbu tadqiqot kichik GES va SHESni birgalikda foydalanishni rivojlantirish istiqbollari qaratilgan.

Usullar: tadqiqotning asosiy usuli – kichik GESlarning energiya ishlab chiqarish imkoniyatini tahlil qilish. Hajmiy kamayishlarni o'rganish va hududa shamol potensialini baholash hamda uning yordamida bu yo'qotishlarni qisman yoki to'liq qoplashi mumkinligini tahlil qilish. Ushbu usul kichik GESlarning potensial pasayishini shamol energiyasi hisobiga kompensatsiya qilishning ishonchligini ko'rib chiqiladi.

Natijalar: tadqiqot tahlillar shuni ko'rsatdiki, O'zbekistonning kichik GESlari mavsumiy quvvat tebranishlari sezilarli darajada o'zgarishi kuzatiladi. Yoz oylarida daryolar va kanallardagi suv resurslari sug'rishga uzatilishi va GESlarni suv ta'minoti kamayishi natijasida ishlab chiqarish hajmining eng katta pasayishi aniqlandi. Shamol energetikasi bo'yicha olingan ma'lumotlar shuni ko'rsatdiki, yoz oylarida shamol elektr stansiyalarining potentsiali nisbatan barqaror bo'lish aniqlandi. Bu SHESni mavsumiy quvvat tanqisligini qoplash uchun istiqbolli yechim sifatida ko'rsatadi.

Hisob-kitoblar shuni ko'rsatdiki, SHES quvvati kichik GES ishlab chiqarishining mavsumiy pasayishini qisman qoplash uchun yetarli. Bu esa shamol energetikasi qurilmalarini umumiy energiya balansiga kiritish maqsadga muvofiqligini tasdiqlaydi, bu orqali barqaror energiya ta'minoti ta'minlanishi mumkin.

Kalit so'zlar: gidroenergetika, kichik GES, shamol energiyasi, energiya balansi, O'zbekiston, barqaror rivojlanish, iqlim omillari, mavsumiy tebranishlar, shamol elektr energiyasi, gidroenergetika, integratsiya, kompensatsiya, qayta tiklanadigan energiya manbalari.

For citation: R.A. Zahidov, J.X. Mamadaliyev. Interaction of wind and hydropower: potential for compensation under seasonal fluctuations. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2025, no. 2, pp. 1–10.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.15729868>

Received: 10.04.2025

Revised: 28.04.2025

Accepted: 22.05.2025

Published: 24.06.2025

Copyright: © Roman A. Zahidov, Jaxongir X. Mamadaliyev, 2025. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Взаимодействие ветровой и гидроэнергетики: потенциал компенсации в условиях сезонных колебаний

Ромэн А. Захидов¹, Жахонгир Х. Мамадалиев²

¹) д.т.н., академик, Институт проблем энергетики Академии наук Республики Узбекистан, Ташкент, 100204, Узбекистан; energetika@academy.uz <https://orcid.org/0009-0001-4638-1043>

²) докторант Наманганский инженерно-технологический институт, Наманган, 160115, Узбекистан; mamadaliyevjahongir@mail.ru <https://orcid.org/0009-0004-1439-1468>

Актуальность: в последние десятилетия возобновляемые источники энергии (ВИЭ) приобретают возрастающее значение в глобальной энергетической стратегии. Увеличение спроса на энергию, истощение природных ресурсов и изменения климатических условий диктуют необходимость перехода от традиционных энергетических систем к более устойчивым альтернативам. В этом контексте страны Центральной Азии, в частности Узбекистан, сталкиваются с рядом вызовов, связанных с ограниченными водными ресурсами и возрастающей потребностью в электроэнергии. Энергетическая система Узбекистана исторически базировалась на ископаемом топливе и гидроэнергетике. Однако сокращение запасов углеводородов и нарастающие климатические изменения приводят к снижению доступности водных ресурсов, что



оказывает непосредственное влияние на стабильность гидроэнергетических объектов. В условиях сезонных засух и климатических аномалий производственные мощности малых ГЭС могут становиться недостаточными для обеспечения потребностей как бытового, так и промышленного секторов. Анализ климатических условий региона указывает на высокий потенциал ветроэнергетики как стабильного источника электроэнергии, особенно в периоды сезонного снижения водных ресурсов. Комбинированное использование малых ГЭС и ветроэлектростанций (ВЭС) представляется эффективным решением для повышения надежности энергоснабжения в условиях нестабильного водного баланса. Данный подход не только снижает зависимость от природных факторов, но и способствует сокращению выбросов углекислого газа, что соответствует целям устойчивого развития и обеспечивает эффективное использование потенциала ВИЭ.

Цель: провести комплексное исследование текущего состояния и потенциала малых ГЭС в Узбекистане, а также оценить возможности компенсации их сезонных колебаний выработки за счет интеграции ВЭС. Особое внимание уделяется перспективам ветроэнергетики как устойчивого дополнения к гидроэнергетике, особенно в летний период, характеризующийся снижением объемов водных ресурсов. Настоящее исследование направлено на разработку концепции совместного использования малых ГЭС и ВЭС для повышения устойчивости энергетического сектора.

Методы: в рамках исследования применяется системный анализ, включающий моделирование объемов генерации малых ГЭС, оценку ветрового потенциала в регионе и расчет возможной степени компенсации сезонных потерь за счет ВЭС. Используются методы математического моделирования и прогнозирования, позволяющие количественно оценить влияние комбинированного использования малых ГЭС и ВЭС на энергетический баланс региона. Дополнительно проведен анализ снижения объемов выработки энергии малых ГЭС, а также оценка потенциала ветровой энергии для частичной или полной компенсации этих потерь. Данный методологический подход рассматривается как один из наиболее надежных способов повышения устойчивости малой гидроэнергетики за счет адаптивной интеграции ветроэнергетики.

Результаты: проведенный анализ выявил выраженные сезонные колебания мощности малых ГЭС в Узбекистане, достигающие максимального спада в летние месяцы, что обусловлено перераспределением водных ресурсов в пользу ирригационных нужд. Полученные данные по ветроэнергетике свидетельствуют о высокой стабильности мощности ВЭС в летний период, что подтверждает их потенциал в качестве инструмента для компенсации сезонного дефицита гидроэнергетической генерации. Расчеты показали, что интеграция ВЭС в энергетический баланс региона позволяет частично нивелировать сезонное снижение выработки малых ГЭС, что подтверждает целесообразность развития комбинированных схем генерации с использованием ВИЭ. Таким образом, предложенный подход может способствовать повышению стабильности энергоснабжения и снижению углеродного следа энергетического сектора Узбекистана.

Ключевые слова: гидроэнергетика, малые ГЭС, ветровая энергия, энергетический баланс, Узбекистан, устойчивое развитие, климатические факторы, сезонные колебания, ветровая энергия, гидроэнергетика, взаимодействие, сезонные колебания, компенсация, устойчивое развитие, возобновляемые источники энергии.

Interaction of wind and hydropower: potential for compensation under seasonal fluctuations

Roman A. Zahidov¹, Jaxongir X. Mamadaliyev²

¹) DSc, akademik., Institute of Energy Problems of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, 100204, Uzbekistan; energetika@academy.uz <https://orcid.org/0009-0001-4638-1043>

²) Doctoral student Namangan engineering and technology institute, Namangan, 160115, Uzbekistan; mamadaliyevjahongir@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-1439-1468>

Relevance: in recent decades, renewable energy sources (RES) have become increasingly important in global energy policy. Increasing energy demand, depletion of natural resources and climate change require a transition from traditional energy sources to more sustainable solutions. In this context, Central Asia and, in particular, Uzbekistan, face significant challenges due to limited water resources and growing demand for electricity. The energy system of Uzbekistan has long been dependent on fossil fuels and hydroelectric power plants, but climate change is increasingly leading to a decrease in water resources, which has a direct impact on the stability of hydropower. In conditions of dry seasons and climatic anomalies, the capacity of small hydroelectric power plants often becomes insufficient to meet the needs of the population and industry. In parallel with this, wind energy demonstrates sustainable potential in the climatic conditions of the region, providing stable electricity generation during periods of low water levels. The combined use of small hydropower plants (HPPs) and wind power plants (WPPs) can be a solution to ensure a stable energy supply, especially in conditions of water scarcity. This approach not only helps to reduce dependence on natural factors, but also reduces the carbon footprint, which is in line with sustainable development goals and allows for more efficient use of the potential of renewable energy sources.

Aim: to research the status and potential of small hydroelectric power plants in Uzbekistan, as well as to explore the possibilities of compensating for seasonal fluctuations in hydroelectric power plant output by using wind power plants. The advantages of integrating wind energy are obvious: it can become a sustainable addition to hydropower, especially in the summer months when water resources are reduced. This study aims to assess the prospects for an integrated approach to the development of small hydroelectric power plants and wind power plants in the energy sector of Uzbekistan

Methods: the main method of our study is to analyze and validate that with a decrease in energy production at



small hydroelectric power plants, wind power plants can compensate for the total or partial reduction in potential are considered one of the most reliable methods for compensating the potential of small hydroelectric power plants at the expense of wind energy.

Results: the analysis showed that small hydroelectric power plants in Uzbekistan experience significant seasonal fluctuations in capacity. In the summer months, the greatest decrease in productivity occurs due to a decrease in the level of water resources in rivers and canals.

Wind energy data showed that in the summer months, when the capacity of small hydroelectric power plants decreases, the potential of wind turbines remains relatively stable. This makes wind power plants a promising solution for compensating for seasonal power deficits. Calculations showed that the capacity of wind power plants is sufficient to partially compensate for the decline in output at small hydroelectric power plants in the periodic period. This confirms the feasibility of including wind power plants in the overall energy balance to ensure a more stable energy supply.

Keywords: hydropower, small hydroelectric power plants, wind energy, energy balance, Uzbekistan, sustainable development, climatic factors, seasonal fluctuations, wind energy, hydropower, interaction, seasonal fluctuations, compensation, sustainable development, renewable energy sources.

1. Введение (Introduction)

Современная энергетическая парадигма характеризуется двумя взаимосвязанными тенденциями: непрерывно растущим глобальным спросом на энергию и необходимостью сохранения экологического баланса планеты. Для разрешения этого противоречия ученые разработали концепцию возобновляемых источников энергии (ВИЭ), которые используют природные явления в качестве источников генерации электроэнергии. Многие страны мира взяли курс на развитие "зеленой энергетики" с целью снижения выбросов парниковых газов и сохранения экосистемы для будущих поколений.

Стабильное энергоснабжение является критическим фактором экономического роста и устойчивого развития Узбекистана. В условиях растущего спроса на электроэнергию и ограниченных природных ресурсов стране необходимо развивать возобновляемые источники энергии, среди которых наибольшее внимание уделяется гидроэнергетике и ветровой энергетике. Малые гидроэлектростанции (ГЭС) обладают существенными преимуществами, включая операционную гибкость и относительно низкое экологическое воздействие, однако их производительность подвержена значительным сезонным колебаниям, зависящим от уровня осадков и доступности водных ресурсов.

Энергетическая проблема является глобальной, но в последние десятилетия особую актуальность приобрел вопрос о минимизации эффекта парниковых газов. Узбекистан активно стремится к развитию возобновляемой энергетики, о чем свидетельствуют принятые законодательные акты и постановления в области "зеленой" энергетики.

В частности, в целях обеспечения быстрого развития возобновляемой энергетики, диверсификации источников производства электроэнергии, сокращения использования природного газа и привлечения прямых иностранных инвестиций в электроэнергетический сектор, правительством Узбекистана реализован ряд стратегических проектов. Например, в марте 2018 года было подписано соглашение с компанией "Abu Dhabi Future Energy Company PJSC – Масдар" о финансировании, проектировании и строительстве ветроэлектростанций общей мощностью до 1300 МВт в различных регионах страны [1-7].

Исторически энергетическая система Узбекистана базировалась преимущественно на традиционных теплоэлектростанциях, доля которых составляла более 85% [8]. Однако с 2017 года намечился существенный сдвиг в сторону развития гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии. За короткий период доля "зеленой" энергетики увеличилась в 2-3 раза, что является значительным достижением [9].

Проблема снижения выбросов парниковых газов решается путем целенаправленного внимания к строительству и реконструкции гидроэлектростанций, особенно в странах, не имеющих выхода к морю. При этом существует объективное ограничение – коэффициент полезного действия гидроэлектростанций снижается из-за природно-климатических условий, поскольку генерация энергии напрямую зависит от водных ресурсов.

В условиях Центральной Азии наблюдается альтернативное решение – благодаря специфическим климатическим условиям, характеризующимся интенсивной солнечной активностью и частыми изменениями поверхностных воздушных потоков, создаются благоприятные предпосылки для развития ветроэнергетики.

Ветроэнергетика, несмотря на многолетнюю историю использования человечеством, получила широкое распространение только в последние 10-20 лет [10]. Это связано с необходимостью энергосбережения и обеспечения электроэнергией удаленных районов. Ветроэнергетика стала одной из основных альтернатив производства экологически чистой электроэнергии.



За последние 25-30 лет наблюдается значительный рост исследований в области нетрадиционных источников энергии, которые, в отличие от органических ископаемых ресурсов, обладают практически неисчерпаемым потенциалом [11].

Переход на возобновляемые источники энергии порождает новые вызовы для управления энергетическими системами. Ветро- и гидроэнергетика могут служить взаимодополняющими источниками электроэнергии. В данной статье рассматривается потенциал ветровой генерации для компенсации снижения выработки ГЭС в зависимости от сезона. Сравнение данных о месячном потенциале ветроэлектростанций и гидроэлектростанций позволит выявить их взаимосвязь и оценить возможность эффективной интеграции.

2. Материалы и методы (Methods and materials)

Методологической основой исследования является системный анализ потенциала компенсации сезонных колебаний выработки малых гидроэлектростанций за счет интеграции ветроэнергетических установок. Предложенный подход базируется на комплексной оценке энергетических показателей и является одним из наиболее надежных методов для обеспечения стабильной выработки электроэнергии в условиях сезонных колебаний гидроресурсов.

Цель данного исследования заключается в анализе возможностей использования ветроэлектростанций (ВЭС) для компенсации сезонных колебаний в производительности малых гидроэлектростанций (ГЭС). Основные задачи исследования включают:

1. **Анализ потенциала малых ГЭС и ветровой энергии в Узбекистане** — проведение оценки среднегодовой выработки электроэнергии, выявление месяцев с наибольшими колебаниями генерации и определение периодов, когда производительность ГЭС наиболее нестабильна. Исследование опирается на данные мониторинга действующих энергетических объектов за 2023 год.

2. **Сравнительный анализ сезонных колебаний выработки энергии на малых ГЭС и ВЭС** — изучение корреляции между снижением уровня воды в реках и водохранилищах и производительностью гидроэлектростанций, а также анализ устойчивости ветроэнергетического потенциала в течение года. Применяется метод статистической обработки временных рядов с использованием коэффициентов вариации для количественной оценки стабильности выработки.

3. **Оценка возможностей компенсации дефицита ГЭС за счет ВЭС** — проведение математического моделирования и расчет компенсационной способности ветряной энергетики для покрытия дефицита мощности, возникающего в периоды пониженной выработки на малых ГЭС. Используется метод оптимизации энергетического баланса с применением алгоритмов линейного программирования.

4. **Анализ экономической целесообразности и экологической устойчивости интеграции ГЭС и ВЭС** — оценка эффективности комбинированных систем с точки зрения снижения углеродного следа, уменьшения эксплуатационных расходов и повышения устойчивости энергосистемы Узбекистана. Применяется метод расчета приведенной стоимости электроэнергии (LCOE) для сравнительного анализа различных конфигураций энергосистем.

Исследование основано на данных метеорологических наблюдений, статистике энергопотребления и технических характеристиках малых ГЭС и ВЭС в Узбекистане. Для обработки данных использовались методы математической статистики и компьютерного моделирования с применением специализированного программного обеспечения для энергетических расчетов.

3. Результаты (Results)

Результаты исследования позволят получить целостное представление о перспективах и преимуществах использования комбинированных систем ГЭС и ВЭС, что может служить основой для планирования дальнейшего развития возобновляемых источников энергии в Узбекистане.

Данные для исследования были взяты из государственных отчетов, а также специализированных публикаций, которые содержат информацию о малых гидроэлектростанциях и ветряных потенциалах.

Основные данные для исследования были определены вовремя исследовании объекта на основе возобновляемых источников энергии среднемесячных потенциалах выработки электроэнергии на малых ГЭС и ВЭС.

Математическая расчёты:

Для моделирования эффективности малых каскадных гидроэлектростанции применялись следующие формулы для расчета мощности и энергии:



$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H ; \quad (1)$$

где: P — мощность (Вт),

ρ — плотность воды (1000 кг/м³),

g — ускорение свободного падения (9,81 м/с²),

Q — расход воды (м³/с),

H — напор (м).

Для расчета произведенной энергии за определённый период времени:

$$E = P \cdot t ; \quad (2)$$

где: E — энергия (Вт·ч),

t — время работы (ч).

Эти формулы использовались для оценки эффективности малых ГЭС, а также для моделирования различных сценариев, при которых каскадные ГЭС работают вместе с солнечными и ветровыми установками.

Для расчета ветровой энергии:

Эффективность ветровой турбины зависит от площади и высоты ее ротора, большое значение также имеют ветровые условия региона расположения.[8]. Для определения эффективности рассмотрим следующие основные параметры и формулы.

Площадь ротора:

$$A = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 ; \quad (3)$$

где, D- диаметром ротора также понимается диаметр лопастей ветряной турбины.

Скорость ветра зависит от высоты и может быть определена как:

$$V(h) = V_{пер} \left(\frac{h}{h_{пер}}\right)^{\alpha} ; \quad (4)$$

$V_{пер}$ - скорость ветра на высоте (м/с);

h - высота турбины (м);

$h_{пер}$ - опорная высота (м);

α - коэффициент распределения скорости ветра.

Расчет энергии ветра:

$$E_{ветр} = 0.5 \cdot \rho \cdot A_{ветр} \cdot v^3 \cdot \eta_{ветр} ; \quad (5)$$

где: ρ — плотность воздуха (1,225 кг/м³);

$A_{ветр}$ — площадь ротора турбины (м²);

v — средняя скорость ветра (м/с);

$\eta_{ветр}$ — КПД ветряной турбины.

Расчет общей выработки:

Для комбинированных электростанций общая выработка энергии $E_{об}$ рассчитывается как сумма выработки от всех источников:

$$E_{об} = E_{гэс} + E_{ветр} ; \quad (6)$$

где: $E_{гэс}$ — выработка энергии каскадной ГЭС;

$E_{ветр}$ — выработка ветровых турбин.

С помощью выше приведенных способом расчетов определены среднесезонных потенциалах выработки электроэнергии на малых ГЭС и ВЭС. Данные о потенциалах водяного и ветряного энергии позволяют оценить сезонные колебания при выработки энергии.

В исследование мы проанализируем возможности повышение вырабатываемую энергии при колебании энергопотенциала малого ГЭС на счёт потенциала ветроэнергии. Анализы показали восхитительную результаты. При скачке в сезонные выработки энергии гидроэлектростанции снижается примерно на от 12 до 24 % от номинальной мощности. Это может показаться мизерными цифрами, но при крупных и средних станциях под этими цифрами стоит ежедневное потребление энергии целого село даже несколько селов. В основном гидроэлектростанциях коэффициент полезного действия бывают от 70 до 90% от номинала, если сооружение работал много время, то этот показатель снижаете на счет деградации и показатель может достигается 40% даже ниже. Для компенсаций скачка надо установить ветроустановок с соответствующими параметрами на территории гидроэлектростанции.

Комплексный анализ сезонной изменчивости работы малых гидроэлектростанций и ветряных электростанций позволил выявить закономерности их взаимодействия в рамках интегрированной энергетической системы. Установлено, что наибольшая выработка гидроэлектроэнергии приходится на зимне-весенний период, когда уровень водных ресурсов находится на максимальном уровне. В летний и осенний периоды наблюдается значительное снижение выработки, что связано с уменьшением стока водоёмов и снижением объёма осадков. В отличие от гидроэлектростанций, ветряная генерация демонстрирует относительно стабильные показатели на протяжении всего года, с незначительным увеличением осенью и зимой, что обусловлено сезонной активностью воздушных потоков.

Годовая динамика выработки малых ГЭС и ВЭС представлена на рис.1, где зафиксированы периоды максимальной и минимальной генерации. Анализ этих данных позволил установить, что ветряная энергетика обладает значительным потенциалом компенсации снижения гидроэнергетической генерации в периоды маловодья. Так, в сентябре и октябре, когда выработка ГЭС достигает минимальных значений, ветряные станции обеспечивают стабильное поступление электроэнергии, снижая нагрузку на другие источники.



Рис.1. Потенциал ГЭС по выработке энергии за по месяцам 2023 год

Fig.1. Energy potential of small hydroelectric power plants in 2023 by month

Моделирование комбинированной работы малых ГЭС и ВЭС показало, что интеграция этих источников энергии позволяет повысить коэффициент использования установленной мощности. Представленные на рис.2 данные демонстрируют потенциал ветроэнергетики в регионе исследования, подтверждая её способность частично замещать гидроэнергетическую генерацию в периоды её снижения.



Рис.2. Энергетический потенциал ветроэлектростанции за 2023году по месяцам

Fig.2. Energy potential of wind power plant for 2023 by month

Сравнительный анализ сезонных колебаний двух типов электростанций на рис.3 указывает на выраженную взаимодополняемость данных источников энергии, что создаёт условия для их эффективного комбинированного использования.

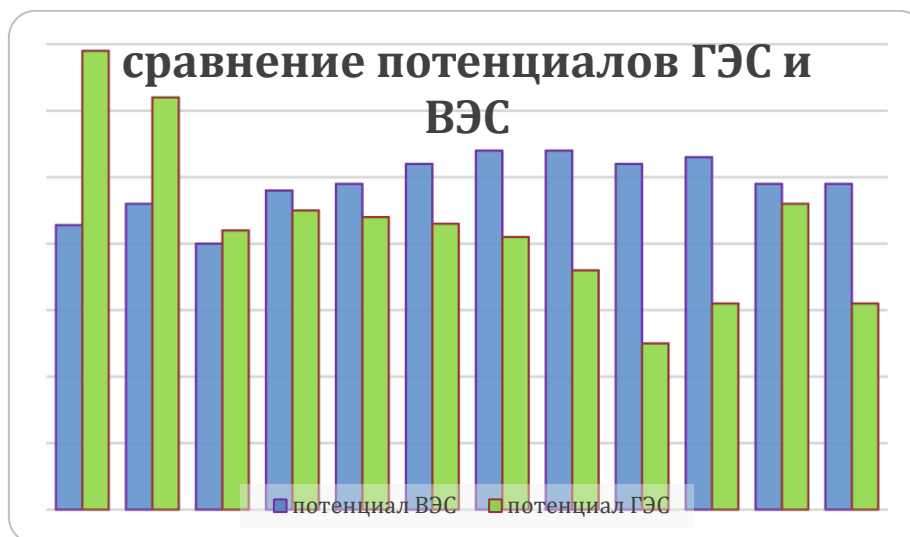


Рис.3. Сравнительный показатели потенциалов ГЭС и ВЭС в 2023 году
Fig.3. Comparative indicators of hydroelectric and wind power plant potential in 2023

Результаты оценки компенсирующего эффекта ВЭС представлены на рис.4, где проанализированы прогнозируемые параметры устойчивости энергосистемы при совместной эксплуатации гидро- и ветроэлектростанций. Данные указывают на возможность повышения энергетической надёжности при условии грамотного распределения нагрузок и внедрения интеллектуальных систем управления.

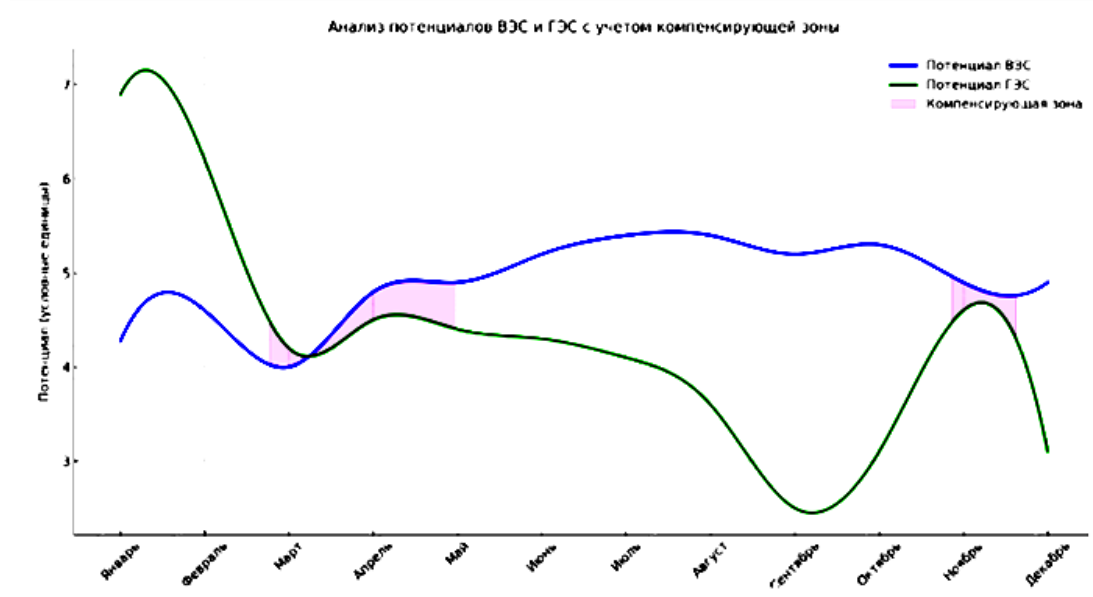


Рис.4. Анализ потенциалов ГЭС и ВЭС с компенсирующими зонами в течении 2023 года
Fig.4. Analysis of potentials of hydroelectric and wind power plants with compensation

4. Обсуждение (Discussion)

Полученные результаты подтверждают высокую эффективность комбинированных систем на основе малых ГЭС и ВЭС в обеспечении стабильного энергоснабжения. Анализ сезонных колебаний выработки электроэнергии свидетельствует о выраженной зависимости гидроэнергетики от гидрометеорологических условий, тогда как ветряная генерация демонстрирует более равномерное распределение мощности. Это делает возможным интеграцию двух типов электростанций для минимизации влияния сезонных факторов и сглаживания колебаний энергоснабжения.

Экономическая оценка показала, что внедрение комбинированных ГЭС-ВЭС систем позволяет снизить зависимость от традиционных тепловых электростанций, что ведёт к сокращению топливных затрат и уменьшению операционных расходов. Оптимизация распределения нагрузки между ГЭС и ВЭС позволяет добиться повышения коэффициента использования установленной мощности, что представляется перспективным направлением развития энерге-



тики.

Важным аспектом является также экологическая составляющая использования комбинированных систем. Снижение потребности в ископаемых видах топлива благодаря увеличению доли возобновляемых источников энергии способствует уменьшению выбросов углекислого газа, что соответствует стратегическим задачам устойчивого развития. Кроме того, сокращение использования традиционных резервных мощностей снижает нагрузку на экосистемы, минимизируя негативное воздействие на водные ресурсы.

С учётом выявленных закономерностей перспективным направлением дальнейших исследований является разработка интеллектуальных алгоритмов управления комбинированными энергосистемами, позволяющих в реальном времени перераспределять нагрузку между ГЭС и ВЭС с учётом метеорологических прогнозов и динамики энергопотребления. Дальнейшая оптимизация этих процессов позволит не только повысить эффективность интегрированных энергосистем, но и сократить зависимость от внешних факторов, повышая надёжность и устойчивость энергоснабжения.

5. Заключение (Conclusion)

1. В результате анализа можно утверждать, что ветровой потенциал может эффективно компенсировать снижение выработки ГЭС в летние месяцы. Интеграция этих двух источников энергии представляет собой перспективный путь к созданию более устойчивой энергетической системы, что имеет важное значение для снижения углеродного следа и достижения целей устойчивого развития.

2. Анализ показал, что в условиях сезонного снижения выработки малых ГЭС, внедрение ветровой энергетики представляет собой эффективное решение для поддержания энергетического баланса. Комбинированное использование малых ГЭС и ВЭС позволяет обеспечить устойчивое энергоснабжение в Узбекистане, минимизируя зависимость от водных ресурсов. Предлагаемая модель интеграции ВЭС и малых ГЭС создаёт предпосылки для более стабильного и экологичного энергетического комплекса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Постановление Президента Республики Узбекистана №ПП-4933 от 22.12.2020 года о мерах по реализации инвестиционного проекта «Строительство ветроэлектростанции мощностью 500 МВт в Навоийской области».

2. Постановление Президента Республики Узбекистана от 23.02.2021 №ПП-5001 о мерах по реализации инвестиционного проекта «Строительство ветроэлектростанции мощностью 300-500 МВт в Пешкусском районе Бухарской области».

3. Постановление Президента Республики Узбекистана от 23.02.2021 № ПП-5003 о мерах по реализации инвестиционного проекта «Строительство ветроэлектростанции мощностью 500 МВт в Гиждуванском районе Бухарской области».

4. Постановление Президента Республики Узбекистана от 07.08.2022 № ПП-314 «О внесении изменений и дополнений в некоторые документы Президента Республики Узбекистан в целях выделения необходимых земельных участков для развития возобновляемых источников энергии».

5. Постановление Президента Республики Узбекистана от 16.02.2023 №ПУ-57 «О мерах по ускорению внедрения возобновляемых источников энергии и энергосберегающих технологий в 2023 году».

6. Постановление Президента Республики Узбекистан от 30.03.2023 №ПП-104 о мерах по дальнейшему реформированию гидроэнергетического комплекса.

7. Постановление Президента Республики Узбекистана от 01.04.2023 №ПП-107 «О неотложных мерах по повышению эффективности использования водных ресурсов».

8. Ж.Х.Мамадалиев. Нынешнее состояние и развитие возобновляемых источников энергии в мировой энергетике за последние 3 года // Research Focus International Scientific Journal // | volume 3 | issue 7 | 2024.

9. Mamadaliyev J.X. So'nggi yillarda jahon energetika tizimidagi o'zgarishlar va unda qayta tiklanadigan energiya manbalarining ulushi // Research Focus International Scientific Journal // | volume 3 | issue 9 | 2024.



10. Захидов Р.А., Мамадалиев Ж.Х. Вопросы повышения производства энергии на малых гидроэлектрических станциях, комбинированных с возобновляемыми источниками энергии // *Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE)*. 2024;(7):67-74.
11. Ж.Мамадалиев. Гидроэлектростанциялар жойлашган худудларда шамол энергиясидан фойдаланиш имкониятлари (Наманган вилояти мисолида) // «Ўзбекгидроэнергетика», научно-технический журнал, 2023, № 4 (20).
12. В. Паломеке, И. Вальдес, Н. Хара и Ф. Рейносо. Проектирование мини-центральной гидроэлектрики, Iber. Ж. Инф. Сист. Технол., Июнь, 2020.
13. Р. Питерс, Дж. Берлекамп, К. Токнер и К. Зарфл, RePP Africa - географическая и тщательно подобранная база данных о существующих и предлагаемых ветряных, солнечных и гидроэлектростанциях, Sci. Данные, том. 10., 1, 2023, номер документа: 10.1038/s41597-022-01922-1.
14. Л. Цзо и др. Оценка экономической эффективности ветровой наддувочной солнечной электростанции с дымоходом, сочетающей опреснение и отходящее тепло после оптимизации параметров, Energy, vol. 227, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.120496.
15. П.П. Дей, Д.С. Дас, А. Латиф, С.М. Сухейл Хуссейн и Т.С. Устун, Активное управление питанием виртуальной электростанции при проникновении центрального приемника солнечного теплового ветра с использованием метода оптимизации бабочки, Sustain., vol. 12, нет. 17 октября 2020 г., номер домена: 10.3390/SU12176979.
16. К. Тришп, Д. Гитте, Дж. Кинг и А. Баркер, Упрощенный и эффективный подход к оптимизации площадки гибридной ветровой и солнечной электростанции, Wind Energy Sci., vol. 7, нет. 2 октября 2022 г., doi: 10.5194/wes-7-697-2022.
17. Дж. А. Ордонес, М. Фриц и Дж. Экстайн. Уголь против, возобновляемые источники энергии: оптимизация энергетического сектора Индонезии с наименьшими затратами, Energy Sustain. Дев., вып. 68, 2022, номер документа: 10.1016/j.esd.2022.04.017.
18. В. Паломеке, И. Вальдес, Н. Хара и Ф. Рейносо. Проектирование мини-центральной гидроэлектрики, Iber. Ж. Инф. Сист. Технол., нет.Июнь, 2020.
19. Кузнецов П. и др. Параметрическая оптимизация комбинированных ветро-солнечных электростанций для устойчивого развития умного города, Прикл. наук, том. 11, нет. 21, 2021, doi: 10.3390/app112110351.
20. Дж. Смит. Integrated Renewable Energy Systems: Hydropower and Wind Energy Interactions. Energy Policy, 2019.
21. Л. Исмаилова. Renewable Energy Development in Central Asia. //Central Asian Energy Journal, 2020.
22. Л. Крон, С. Бейкер, Д. Андерсон. Hybrid Renewable Energy Systems. //Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2021.
23. С. Хасан. Economic Viability of Hybrid Energy Systems. //Renewable Energy, 2021.
24. Государственный отчет по развитию возобновляемой энергетики в Узбекистане.

REFERENCES

1. Presidential Decree of the RePublic of Uzbekistan No. PD-4933 dated 22.12.2020 on measures for the implementation of the investment project "Construction of a 500 MW wind power plant in the Navoi region."
2. Presidential Decree of the RePublic of Uzbekistan No. PD-5001 dated 23.02.2021 on measures for the implementation of the investment project "Construction of a 300-500 MW wind power plant in the Peshku district of the Bukhara region."
3. Presidential Decree of the RePublic of Uzbekistan No. PD-5003 dated 23.02.2021 on measures for the implementation of the investment project "Construction of a 500 MW wind power plant in the Gijduvan district of the Bukhara region."
4. Presidential Decree of the RePublic of Uzbekistan No. PD-314 dated 07.08.2022 "On amendments and additions to certain Presidential documents of the RePublic of Uzbekistan to allocate necessary land plots for the development of renewable energy sources."
5. Presidential Decree of the RePublic of Uzbekistan No. PD-57 dated 16.02.2023 "On measures to accelerate the introduction of renewable energy sources and energy-saving technologies in 2023."



6. Presidential Decree of the RePublic of Uzbekistan No. PD-104 dated 30.03.2023 on measures for further reforming the hydroelectric sector.
7. Presidential Decree of the RePublic of Uzbekistan No. PD-107 dated 01.04.2023 "On urgent measures to improve the efficiency of water resource utilization."
8. J.X. Mamadaliyev // "Current State and Development of Renewable Energy Sources in Global Energy Over the Last 3 Years" // *Research Focus International Scientific Journal* // | Volume 3 | Issue 7 | 2024.
9. J.X. Mamadaliyev // "Changes in the Global Energy System in Recent Years and the Share of Renewable Energy Sources in It" // *Research Focus International Scientific Journal* // | Volume 3 | Issue 9 | 2024.
10. R.A. Zahidov, J.X. Mamadaliyev // "Issues of Increasing Energy Production at Small Hydropower Plants Combined with Renewable Energy Sources" // *Alternative Energy and Ecology (IS-JAEE)*, 2024; (7): 67-74.
11. J. Mamadaliyev // "Opportunities for Utilizing Wind Energy in Areas Where Hydropower Plants Are Located (Case Study of Namangan Region)" // *Uzbekgidroenergetika*, Scientific-Technical Journal, 2023, No. 4 (20).
12. V. Palomeque, I. Valdes, N. Jara, and F. Reinoso, "Design of Mini-Hydropower Plants," *Iber. Journal of Information Systems and Technology*, June 2020.
13. R. Peters, J. Berlekamp, K. Tokner, and K. Zarfl, "RePP Africa - A Geographical and Curated Database on Existing and Proposed Wind, Solar, and Hydropower Plants," *Scientific Data*, Vol. 10, No. 1, 2023, DOI: 10.1038/s41597-022-01922-1.
14. L. Tso et al., "Economic Efficiency Assessment of a Wind-Solar Hybrid Power Plant with a Chimney Integrating Desalination and Waste Heat Optimization," *Energy*, Vol. 227, 2021, DOI: 10.1016/j.energy.2021.120496.
15. P.P. Dey, D.S. Das, A. Latif, S.M. Suhail Hussain, and T.S. Ustun, "Active Power Management of a Virtual Power Plant Integrating Centralized Solar Thermal Wind Energy Using the Butterfly Optimization Algorithm," *Sustainability*, Vol. 12, No. 17, October 2020, DOI: 10.3390/SU12176979.
16. K. Tripp, D. Gitte, J. King, and A. Barker, "A Simplified and Efficient Approach to Hybrid Wind-Solar Power Plant Site Optimization," *Wind Energy Science*, Vol. 7, No. 2, October 2022, DOI: 10.5194/wes-7-697-2022.
17. J.A. Ordonez, M. Fritz, and J. Eckstein, "Coal vs. Renewable Energy: Least-Cost Optimization of Indonesia's Energy Sector," *Energy for Sustainable Development*, Vol. 68, 2022, DOI: 10.1016/j.esd.2022.04.017.
18. V. Palomeque, I. Valdes, N. Jara, and F. Reinoso, "Design of Mini-Hydropower Plants," *Iber. Journal of Information Systems and Technology*, June 2020.
19. P. Kuznetsov et al., "Parametric Optimization of Combined Wind-Solar Power Plants for Sustainable Smart City Development," *Applied Sciences*, Vol. 11, No. 21, 2021, DOI: 10.3390/app112110351.
20. J. Smith, "Integrated Renewable Energy Systems: Hydropower and Wind Energy Interactions," *Energy Policy*, 2019.
21. L. Ismailova, "Renewable Energy Development in Central Asia," *Central Asian Energy Journal*, 2020.
22. L. Kron, S. Baker, D. Anderson, "Hybrid Renewable Energy Systems," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2021.
23. S. Hasan, "Economic Viability of Hybrid Energy Systems," *Renewable Energy*, 2021.
24. State Report on the Development of Renewable Energy in Uzbekistan.