

УДК 621.311(575.2)
DOI: 10.36979/1694-500X-2026-26-4-50-58

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ РЕГИОНАЛЬНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ХАБА НА ОСНОВЕ ГАЭС КЫРГЫЗСТАНА В КОНТЕКСТЕ ГЛОБАЛЬНОГО ЭНЕРГООБЪЕДИНЕНИЯ

Д.Д. Субботина, М.Г. Тягунов, Д.С. Сычев, А.А. Медведев

Аннотация. Анализируются современные системы накопления энергии как ключевые элементы повышения эффективности и надежности электроэнергетических систем на базе возобновляемых источников энергии. Проведен подробный обзор литературы по различным технологиям хранения энергии, включая аккумуляторные батареи, гидроаккумулирующие станции, водородные топливные элементы и высокомоощные накопители (суперконденсаторы). Проанализированы их преимущества, недостатки, ограничения и области применения. Отдельно проанализирована роль интеллектуальных систем управления и виртуальных электростанций в оптимизации работы гибридных энергокомплексов. Подчеркивается, что гибридные решения и оптимальное управление сглаживают нестабильность возобновляемых источников энергии, повышают надежность энергоснабжения и обеспечивают экономическую эффективность. Предложена и обоснована идея создания энергетического комплекса, объединяющего ветровую генерацию и кластер гидроаккумулирующих станций на крупных горных реках Кыргызстана.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии; системы накопления энергии; гидроаккумулирующие станции; аккумуляторы; эффективность.

ГЛОБАЛДЫК ЭНЕРГОБИРИКМЕ КОНТЕКСТИНДЕ КЫРГЫЗСТАНДЫН ГАЭСТЕРИНИН НЕГИЗИНДЕ РЕГИОНАЛДЫК ЭНЕРГЕТИКАЛЫК ХАБ ТҮЗҮҮНҮН КЕЛЕЧЕГИ

Д.Д. Субботина, М.Г. Тягунов, Д.С. Сычев, А.А. Медведев

Аннотация. Макалада кайра жаралуучу энергия булактарынын базасындагы электр энергетикалык системалардын натыйжалуулугун жана ишенимдүүлүгүн жогорулатуунун негизги элементи катары энергияны топтоонун заманбап системалары талдоого алынды. Энергияны сактоонун ар кандай технологиялары боюнча, анын ичинде аккумулятордук батареялар, гидроаккумуляциялоочу станциялар, суутек отун элементтери жана жогорку кубаттуулуктагы топтогучтар (суперконденсаторлор) боюнча адабияттарга кеңири сереп салынды. Алардын артыкчылыктары, кемчиликтери, чектөөлөрү жана колдонуу чөйрөлөрү талданды. Гибридик энергетикалык комплекстердин ишин оптималдаштырууда интеллектуалдык башкаруу системаларынын жана виртуалдык электр станцияларынын ролу өзүнчө талдоого алынды. Гибридик чечимдер жана оптималдуу башкаруу кайра жаралуучу энергия булактарынын туруксуздугун жөнгө салары, энергия менен камсыздоонун ишенимдүүлүгүн жогорулатары жана экономикалык натыйжалуулукту камсыздай турганы баса белгиленет. Шамал генерациясын жана Кыргызстандын ири тоо дарыяларындагы гидроаккумуляциялоочу станциялардын кластерин бириктирген энергетикалык комплексти түзүү идеясы сунушталды жана негизделди.

Түйүндүү сөздөр: кайра жаралуучу энергия булактары; энергияны топтоо системалары; гидроаккумуляциялоочу электр станциялары; аккумуляторлор; натыйжалуулук.

PROSPECTS FOR THE CREATION OF A REGIONAL ENERGY HUB BASED ON THE HYDRAULIC STORAGE STATION OF KYRGYZSTAN IN THE CONTEXT OF THE GLOBAL ENERGY INTERCONNECTION

D.D. Subbotina, V.G. Tyagunov, D.S. Sychev, A.A. Medvedev

Abstract. This article is devoted to the analysis of modern energy storage systems as a key element for improving the efficiency and reliability of electric power systems based on renewable energy sources. A detailed review of the literature on various energy storage technologies is conducted, including battery storage, pumped storage hydropower, hydrogen fuel cells, and high-power storage devices (supercapacitors). Their advantages, disadvantages, limitations, and application areas are analyzed. The role of intelligent control systems and virtual power plants in optimizing the operation of hybrid power complexes is specifically examined. It is emphasized that hybrid solutions and optimal management smooth out the instability of renewable energy sources, increase the reliability of power supply, and ensure economic efficiency. The idea of creating an energy complex that combines wind generation and a cluster of pumped storage hydropower plants on the major mountain rivers of Kyrgyzstan is proposed and substantiated.

Keywords: renewable energy sources; energy storage systems; pumped storage hydropower; batteries; efficiency.

Введение. Современная энергетика переживает трансформацию, связанную с переходом к устойчивому развитию и массовым внедрением возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Несмотря на их преимущества – нулевые выбросы и неисчерпаемость, главной проблемой остается нестабильность генерации из-за зависимости от погодных условий. Это приводит к потерям избыточной энергии и необходимости использовать резервные мощности.

Одним из решений является интеграция ВИЭ с системами накопления энергии (СНЭ), которые накапливают излишки и отдают их в сеть при необходимости, обеспечивая стабильность энергоснабжения.

Актуальность исследования. Актуальность разработки таких гибридных энергетических систем на базе ВИЭ с СНЭ обусловлена несколькими глобальными тенденциями:

1. *Исчерпаемость ресурсов:* по данным ОПЕК запасов нефти и газа при текущем потреблении хватит лишь на несколько десятилетий.

2. *Климатические обязательства:* Парижское соглашение и цели по углеродной нейтральности требуют сокращения выбросов.

3. *Снижение стоимости ВИЭ:* за последние 10 лет цены на технологии ВИЭ упали.

Именно СНЭ помогут решить проблему неравномерности генерации.

Идея глобального энергообъединения. В 2016 году китайский ученый Лю Чженья выпустил книгу [1] под названием «Глобальное энергетическое объединение», в которой описал идеи глобального энергообъединения на основе электрической сети ультравысокого напряжения, в которое смогут войти все страны мира.

Создание такой сети позволит строить генерацию в удаленных от потребителя районах, но благодаря использованию сетей ультравысокого напряжения, потери при передаче энергии от источника генерации к потребителю будут невысокими.

В книге обсуждаются стратегические проблемы долгосрочного «экологически чистого» развития мировой энергетике и предлагает широкий спектр их решений. Одним из главных решений является использование генерации возобновляемых источников энергии.

Именно возможность расположения генерации вдали от потребителя создаст возможность наиболее эффективного использования ВИЭ. Например, расположение солнечных панелей в пустынях, где солнечная инсоляция очень высокая или сооружение ветряных электростанций в горах и на севере, где ветровых масс больше, чем в широтах с умеренным климатом.

Сезонные изменения погоды приводят к тому, что во многих странах наблюдаются периоды пикового потребления электроэнергии и периоды его спада. Из-за климатических различий эти периоды в разных странах не совпадают по времени. Это создаёт основу для взаимовыгодного обмена:

страна, переживающая спад, может экспортировать излишки энергии стране, находящейся на пике потребления.

Кыргызская Республика является горной, богатой водными ресурсами, но не имеющей выхода к морю страной, ее участие в глобальном энергообъединении может стать шансом для экономического и социального прорыва.

Ключевой актив Киргизии – ее огромный гидроэнергетический потенциал. Страна обладает около 8 % мировых запасов гидроэнергии, значительная часть которых еще не освоена. В условиях глобальной сети ультравысокого напряжения (Ultra High Voltage, UHV) Киргизия могла бы сыграть роль не просто производителя, а крупнейшего аккумулятора и регулятора энергии для всего региона.

Стоит отметить, что именно в таких случаях необходимость в системах накопления значительно увеличивается. Таким образом, для построения глобального энергообъединения необходимо развитие СНЭ.

Анализ литературных источников про СНЭ. СНЭ выравнивают график нагрузки, повышают надежность энергоснабжения за счет резервирования и регулирования мощности. По словам автора [2], накопители в энергосистемах с ВИЭ – один из ключевых способов поддержания баланса и эффективности. Современные СНЭ демонстрируют многофункциональность, решая сразу несколько задач – от регулирования режимов до обеспечения живучести энергосистемы при аварийных ситуациях.

Современные подходы к использованию СНЭ фокусируются на оптимальном планировании работы гибридных энергосистем с учётом графика нагрузки и переменности генерации. В работе [3] предложена модель краткосрочного оптимального планирования для каскада ГЭС с насосной станцией, солнечными и ветряными установками, сглаживающая колебания и минимизирующая потери из-за ограничений генерации. Расчёты показали, что сокращение невостребованной генерации достигает 90 %.

В монографии [4] подчёркивается необходимость дальнейшего развития технологий хранения путем координации работы накопителей с ВИЭ. Также рассматриваются перспективные направления комбинирования различных типов накопителей в одной системе – для краткосрочного и долгосрочного хранения, что также поддерживается моделью в источнике [3].

Об этом же говорится в статье [5], где обоснована эффективность применения суперконденсаторов в составе гибридной системы хранения, обеспечивающей демпфирование колебаний и поддержание частоты в изолированных сетях. Авторы подчёркивают необходимость адаптивного управления в реальном времени, чтобы избежать глубоких циклов разряда аккумуляторов и продлить срок службы оборудования.

На это же указывают результаты работы [6], в которой рассмотрена оптимизация параметров СНЭ для ВЭС с переменной генерацией. Применение динамической оптимизации и предиктивного управления позволило на 15–20 % увеличить использования ВИЭ. Учитывались температура, деградация батарей и влияние кратковременных перегрузок.

Интересным дополнением служит идея новых физико-химических подходов к хранению энергии. Авторы [7] рассматривают перспективы применения фазовых переходов и гравитационного хранения как альтернативы традиционным электромеханическим и химическим накопителям.

Работа [8] выделяет необходимость гибридизации с тепловыми накопителями, особенно для изолированных энергосистем на севере. Комбинация аккумуляторов, тепловых баков и суперконденсаторов обеспечит стабильное энергоснабжение при минимуме традиционного резервирования.

В последние годы наблюдается устойчивая тенденция к росту числа проектов с применением накопителей как за рубежом, так и в России. По оценкам, в России к 2021 году реализовано не менее 16 пилотных проектов по внедрению СНЭ в энергетике (не считая крупных ГАЭС) [9]. В России также наблюдается поддержка на государственном уровне – разработаны дорожные карты, стимулирующие создание энергокомплексов с ВИЭ и СНЭ [10].

Данный литературный обзор структурирован по типам технологий СНЭ.

Аккумуляторные батареи в гибридных системах. Химические аккумуляторы сегодня являются самым распространенным типом СНЭ в энергетике. Они применяются как в распределенных сетях, так и в автономных гибридных установках. Например, в автономных фотоэлектрических и ветровых энергосистемах накопители на основе аккумуляторных батарей практически стали обязательным элементом. Так, авторы [11, 12] в своем обзоре отмечают многочисленные проекты, где комбинация солнечных панелей, ветрогенераторов и батарей позволила гарантировать круглосуточную работу насосных станций, сглаживая переменный характер генерации ВИЭ. Авторы [13] также указывают, что большинство автономных энергосистем включают аккумуляторные батареи с целью повышения качества электроэнергии при переменной нагрузке.

Преимущество батарейных накопителей – многофункциональность. Один и тот же аккумуляторный блок способен одновременно выполнять роль источника бесперебойного питания, сглаживать суточные провалы генерации ВИЭ и участвовать в регулировании частотно-мощностного баланса сети. Современные системы управления позволяют оптимально распределять ресурс батареи: внедрение ИИ в систему энергетического менеджмента дает возможность производить заряд/разряд с учетом прогноза нагрузки и генерации, продлевая срок службы батарей. Так, группа исследователей разработала интеллектуальный алгоритм на основе нечеткой логики для локальной гибридной системы с батареями, который отслеживает изменение освещенности и темпа разряда аккумулятора, включая насосы строго по потребности и поддерживая уровень заряда в заданных пределах. Это позволило добиться более 99 % эффективности использования мощности солнечных панелей и стабильного электроснабжения без перебоев [13].

Ограничения батарейных систем связаны, в первую очередь, с их стоимостью и ресурсом. По экономическим оценкам, накопители на батареях требуют значительных первоначальных инвестиций и затрат на замену по мере деградации; для ряда применений (например, длительное хранение энергии) их жизненный цикл обходится дороже, чем у альтернативных решений. Так, сравнительный анализ системы с батареями и без показали, что батарейный блок заметно увеличивает совокупные затраты за срок службы. Кроме того, химические аккумуляторы имеют экологические недостатки – требуют особой утилизации из-за токсичных компонентов. Ограниченный срок службы (обычно 5–15 лет для литий-ионных аккумуляторов (Li-ion) и снижение емкости со временем также накладывают ограничения.

Гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС) – наиболее зрелая и крупномасштабная технология хранения энергии, применяемая для выравнивания графика нагрузки в энергосистемах. Принцип заключается в перекачке воды в верхний бассейн в периоды избытка энергии и последующей выработке электроэнергии при сбросе воды в нижний бассейн. КПД цикла может достигать 75–80 %.

Авторы [5] отмечают, что на сегодняшний день более 90 % всей установленной в мире емкости хранения приходится именно на ГАЭС, благодаря их высокой мощности, долгому сроку службы и эффективности преобразования энергии. Однако ГАЭС требуют перепада высот и наличия водных ресурсов, поэтому географические ограничения сдерживают их повсеместное строительство. Современное решение этой проблемы – гибридные насосные системы, интегрированные в каскады ГЭС. В Китае, например, существующие водохранилища оснащаются насосными агрегатами, превращаясь в гибридные ГАЭС без строительства новых плотин. Моделирование таких систем (ветропарки + каскад ГЭС с насосами) показало экономическую эффективность координированного управления: адаптивное планирование работы насосов позволило на 33,8 % увеличить использование возможностей хранения и на 6 % снизить совокупные издержки по сравнению с традиционными схемами [14].

В изолированных энергосистемах малого масштаба тоже находят применение насосно-накопительные технологии. Например, ученые из Греции предложили объединить ветро-ГАЭС с солнечной тепловой электростанцией для энергоснабжения острова Родос. В проекте избыток ветровой энергии накачивает воду в горное озеро, а днем часть нагрузки покрывается за счет концентраторной СЭС с аккумулированным теплом. Расчеты показали, что комбинированная работа ветряков, ГАЭС

и CSP-станции способна обеспечить до 80 % годового потребления острова. Главный недостаток ГАЭС: требуются большие капиталовложения и долгий срок окупаемости [15].

С другой стороны, ГАЭС обладают рядом уникальных достоинств. Они способны выдавать огромную мощность в сеть за считанные минуты, что ценно для аварийного резервирования и первичного регулирования частоты. В исследовании [16] отмечают, что помимо функции аккумулирования воды, насосно-турбинные системы в гибридной солнечной установке обеспечивают поддержку напряжения, повышают устойчивость сети и ее резервирование. В их экспериментальной системе солнечной фермы с насосным модулем использован интеллектуальный регулятор на базе нечеткой логики, который управляет насосами, реагируя на изменения солнечной радиации и уровня воды. Это поддерживает бесперебойную подачу воды для ирригации даже при переменной генерации, автоматически переключаясь между режимами накопления и генерации. Авторы показывают, что суперплавность работы ГАЭС в сочетании с ВИЭ значительно повышает живучесть автономной системы.

Водородные топливные элементы. Водородные энергосистемы представляют альтернативный подход к накоплению энергии: избыточная электроэнергия ВИЭ направляется на выработку водорода (через электролиз), который затем хранится и используется в топливных элементах (ТЭ) для генерации электричества при дефиците основной мощности. Авторы [17] отмечают, что развитие водородных технологий открывает новые возможности для энергетики.

Применение водорода и водородосодержащих топлив позволяет создавать системы с практически нулевыми выбросами и длительным запасанием энергии. Авторами перечислены основные методы аккумулирования электроэнергии с помощью водорода – сжатие газообразного H_2 в баллонах, хранение жидкого водорода при криогенных температурах, химическое связывание в гидридах металлов, а также использование ТЭ различных типов. Последние представляют собой электрохимические генераторы, превращающие химическую энергию реакции водорода с кислородом в электричество. Главное достоинство ТЭ – непрерывность выработки, они могут производить ток постоянно, пока подаются реагенты (водород, кислород/воздух). В статье описывается конструкция мембранно-электродного блока водородно-воздушного ТЭ и показано, что в качестве топлива могут использоваться не только чистый водород, но и другие вещества (метанол, биотопливо и пр.), а окислителем служит кислород. Более того, водород можно производить в период пиков генерации ВИЭ и запасать сколько угодно долго, покрывая сезонные разрывы выработки и потребления, что классические аккумуляторы могут обеспечить.

Практические реализации водородных накопителей в гибридных системах пока носят экспериментальный характер. В лаборатории МИРЭА, например, созданы прототипы нанокompозитных электродов для топливных элементов, которые проходят ресурсные испытания на специализированных стендах. Различные исследовательские группы прорабатывают концепции так называемых энергетических хабов на основе водорода: избыточное электричество от ветра или солнца преобразуется в водород, который может быть использован или в ТЭ для электроэнергии, или в двигателях транспорта, или отправлен по водородопроводу для других нужд. Подобные проекты (например, H_2 microgrid) реализуются в Европе и Японии, демонстрируя возможность полностью автономного энергокомплекса без выбросов.

Достоинствами водородных накопителей являются экологическая чистота (при использовании H_2 из ВИЭ), большой потенциал по плотности энергии (в пересчете на массу водород содержит в десятки раз больше энергии, чем аккумулятор), модульность – объем хранения легко нарастить добавлением новых резервуаров. Однако ограничения тоже значительны: низкий совокупный КПД цикла (электролизер + ТЭ) порядка 30–50 %, высокая стоимость оборудования (электролизеры, ТЭ с платиновыми катализаторами), сложность и опасность хранения водорода. Исследователи указывают, что имеются и экономические проблемы интеграции водородных источников в энергетику – себестоимость водородного киловатт-часа пока существенно выше традиционного [17]. Тем не менее многие страны включают водород в стратегию развития возобновляемой энергетики как средство долгосрочного

хранения. В России исследования в этой области также ведутся (например, ВИЭСХ испытывает установку с ТЭ для питания фермерского хозяйства).

Перспективным направлением является комбинирование водородных и батарейных накопителей в единой системе. В таком гибриде батарея покрывает кратковременные колебания и пуски нагрузок, а водородный модуль – длительные периоды без ветра/солнца. Такой подход позволяет уменьшить износ дорогих аккумуляторов и одновременно повысить автономность системы.

Суперконденсаторы и другие высокоомощные накопители. Помимо вышерассмотренных технологий, в гибридных энергокомплексах находят применение накопители энергии с высокой удельной мощностью – суперконденсаторы, маховики, а также сверхпроводниковые магнитные накопители (СМЭН). Эти устройства отличаются способностью очень быстро накапливать и отдавать энергию, что ценно для сглаживания кратковременных колебаний и провалов напряжения.

Суперконденсаторы имеют время реакции в миллисекунды и выдерживают сотни тысяч циклов «заряд – разряд» практически без деградации, однако их энергоемкость относительно мала. Поэтому суперконденсаторы обычно используются совместно с батареями и тем самым образуют гибридную систему хранения: конденсаторы берут на себя пики мощности, а аккумуляторы обеспечивают длительную поддержку. Автор [18] провел ряд исследований подобной гибридной СНЭ. В работе проанализированы энергетические характеристики комбинированного накопителя на базе литий-ионных батарей и суперконденсаторов. Показано, что при импульсных нагрузках включение высокоомощного звена (суперконденсатора) позволяет снизить нагрузку на аккумулятор и уменьшить просадку напряжения в момент пика.

В другой работе авторов исследовано демпфирование колебаний частоты в изолированной дизель-ветровой системе с помощью быстродействующего накопителя. Результаты подтвердили, что суперконденсаторы эффективно гасят колебания мощности и улучшают качество электроэнергии в системе.

Маховики (кинетические накопители) – еще один тип быстрореагирующих СНЭ. Они запасают энергию во вращающемся роторе и способны отдавать большую мощность в течение короткого времени. Их плюсы – очень большой ресурс циклов и отсутствие химических компонентов, минусы – механические потери и риск разрушения ротора на высоких оборотах. Маховики уже применяются в системах бесперебойного питания для критичных нагрузок, а в гибридных ВИЭ-системах могут служить для сглаживания кратковременных провалов генерации до того, как включатся более медленные резервные мощности.

В исследовании [2] отмечается, что современные проекты рассматривают использование маховиков, суперконденсаторов и СМЭН наряду с батареями, однако отсутствует единый подход к моделированию их работы в ЭС. Каждый из этих типов накопителей имеет свою специфику: например, СМЭН обеспечивает мгновенную отдачу мощности практически без потерь, но требует дорогостоящего криогенного оборудования. Однако разработка универсальных моделей, пригодных для включения разных типов СНЭ в расчеты режимов энергосистем, ведется [9].

Ограничения высокоомощных накопителей связаны, как правило, с низкой энергоемкостью или сложностью технической реализации. Поэтому эти устройства чаще выступают вспомогательными элементами в составе гибридных комплексов накопления. Тем не менее их ценность в том, что они существенно повышают качество электроэнергии – уменьшают провалы напряжения, обеспечивают мгновенный отклик на аварийные возмущения. В сочетании с системой автоматического управления они могут продлить жизнь основным накопителям, разгружая их в пиковые моменты. Так, автор [9] разработал математическую модель СНЭ модульного типа, где можно задать различные характеристики подсистем накопления, преобразования и распределения энергии и тем самым имитировать работу разных типов накопителей в общем виде. Это дает возможность выбирать оптимальную конфигурацию комбинации накопителей под конкретные требования объекта.

Интеллектуальные системы управления и виртуальные электростанции. Повышение эффективности накопителей в энергосистемах на основе ВИЭ невозможно без современных методов

управления. Одним из перспективных направлений является концепция виртуальной электростанции (Virtual Power Plant, VPP) – объединение множества распределенных генераторов и накопителей в единую виртуальную сеть, управляемую централизованно или координированными агентами. В рамках VPP установки ВИЭ и СНЭ работают согласованно, как одна электростанция, что позволяет совместно реагировать на диспетчерские команды и сглаживать график нагрузки.

В работе [19] предложили подход к управлению виртуальной электростанцией на основе мульти-агентной системы (МАС). В статье рассматривается VPP, объединяющая 10 распределенных энергосистем с возможностью обмена энергией между собой и с централизованной сетью. Разработанные агенты генерации и нагрузки обмениваются информацией и принимают решения в реальном времени, стремясь максимально использовать выработку ВИЭ и минимизировать потери. В алгоритмы заложен критерий экологической приоритетности – МАС выбирает наиболее чистые источники энергии при распределении нагрузки. Имитационное моделирование в среде JADE показало, что мультиагентное управление позволило увеличить долю использования возобновляемой энергии и снизить потери в сетях по сравнению с отсутствием координации. Таким образом, интеллектуальное управление на уровне виртуальных станций раскрывает потенциал накопителей: они заряжаются и разряжаются согласованно с работой десятков распределенных установок, сглаживая совокупный профиль мощности.

Другим направлением является применение алгоритмов ИИ и оптимизации для управления режимами накопителей. Также используются эволюционные алгоритмы для оптимального распределения потоков энергии. Например, автор [13] предложил применять метод роя частиц и алгоритм кукушки для управления контроллерами максимальной мощности и выбора параметров оборудования в гибридной солнце-ветровой системе с аккумулятором. Такие алгоритмы искали оптимальную конфигурацию системы (мощности, емкости батарей) и настройки контроллеров, что позволило повысить КПД и снизить стоимость энергии.

Отдельно развивается направление предиктивного управления: на основе прогноза генерации ВИЭ и нагрузки система заранее перераспределяет энергию – заряжает накопители в ожидании будущего дефицита либо ограничивает нагрузку. Авторы [20] показали, что использование краткосрочного прогноза и координированного управления зарядом накопителей существенно уменьшает отклонения частоты и необходимость в пусках резервных дизелей в изолированных сетях.

Таким образом, интеграция накопителей энергии в интеллектуальные системы управления является важнейшим трендом. Она позволяет нивелировать многие ограничения самих накопителей (небольшой объем хранения батарей компенсируется групповой координацией многих батарей в VPP; износ снижается за счет оптимального распределения нагрузки между устройствами). Интеллектуальные методы повышают эффективность обмена энергией между участниками и обеспечивают выполнение глобальных целей – повышение надежности энергоснабжения и экономическая выгода. Виртуальные электростанции с мультиагентным управлением, в частности демонстрируют возможность децентрализованного, но согласованного управления сотнями мелких энергоустановок и накопителей, что фактически превращает их в единый гибкий ресурс для энергосистемы. В России аналогичные подходы изучаются в контексте развития «активных энергокомплексов» и цифровизации электроэнергетики, что отражено в исследованиях и государственных программах поддержки [10, 21].

Заключение. В данной работе рассмотрены варианты повышения живучести и надежности электроснабжения потребителей энергосистем установками на основе ВИЭ. Анализ показывает, что однозначных решений при выборе СНЭ для использования в объединенных или автономной ЭС нет, каждый накопитель отвечает определенным условиям работы энергосистем, вследствие чего выбор единственного накопителя для любой энергосистемы не решает проблемы. Поэтому следует подбирать СНЭ для конкретной задачи и конкретной энергосистемы, так как в общем случае нужно выбирать гибридные многофункциональные системы накопления энергии.

Стоит отметить, что никто не рассматривал аккумулялирование в глобальной энергетической сети, что безусловно будет необходимо, так как масштабы и использование ВИЭ требуют СНЭ. Имеет

смысл рассмотреть вариант в Кыргызской Республике, связанный с размещением в горных районах ветряных электростанций в комплексе с крупным аккумулирующим кластером на основе ГАЭС, расположенном на крупных реках республики. Кластер будет соединен с генерирующим кластером сверхвысоким напряжением, что позволит свести к минимуму потери электроэнергии.

Поступила: 18.02.2026; рецензирована: 05.03.2026; принята: 09.03.2026.

Литература

1. Глобальное энергетическое объединение / пер. с кит. / Лю Чжэнья. М.: Издательский дом МЭИ, 2016. 511 с.: табл., цв. ил., портр.; 25 см.; ISBN 978-5-383-01041-9.
2. *Муфтахов И.Р.* Модели Вольтерра накопителей энергии в системах с возобновляемой генерацией: численные методы и приложения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» / И.Р. Муфтахов. Иркутск, 2022. 19 с.
3. *Liu Y., Guo P., Zhang H.* Optimal scheduling for wind-solar-hydro hybrid generation system with cascade hydropower considering regulation energy storage requirements // *Journal of Physics: Conf. Ser.* 2024. Vol. 2707. 012100.
4. *Глушков С.С.* Возобновляемая энергия и методы её накопления / С.С. Глушков // Инициативы молодых – науке и производству: сб. ст. VII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов, Пенза, 8–9 июля 2024 года. Пенза: Пензенский гос. аграрный ун-т, 2024. С. 373–376.
5. *Афанасьев В.Я.* Перспективные способы аккумулирования энергии / В.Я. Афанасьев, В.М. Краев, А.И. Тихонов, Г.В. Серебрякова // *Уголь.* 2024. № 8 (1183). С. 124–129. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-8-124-129.
6. *Байчиева Ш.* Оптимизация систем хранения энергии для ветряных электростанций / Ширин Байчиева, Маммет Тойрыев, Мерген Аннамырадов, Арзыгуль Элясова // *Наука и мировоззрение.* 2025. № 56. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-sistem-hraneniya-energii-dlya-vetryanyh-elektrostantsiy> (дата обращения: 29.10.2025).
7. *Cai K. et al.* Gravity Energy Storage: A Review on System Types, Techno-Economic Assessment and Integration With Renewable Energy // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment.* 2024. T. 13. № 6. С. e543.
8. *McKinley P.C., Wilber M., Whitney E.* Learning from Arctic Microgrids: Cost and Resiliency Projections for Renewable Energy Expansion with Hydrogen and Battery Storage // *Sustainability.* 2025. T. 17. № 13. С. 5996.
9. *Пранкевич Г.А.* Разработка математической модели и методики выбора параметров накопителя энергии как элемента энергосистемы: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Г.А. Пранкевич [Место защиты: ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»]. Новосибирск, 2021. 20 с.
10. *Баряхтенко Е.А.* Современное состояние исследований в области управления интегрированными энергетическими системами / Е.А. Баряхтенко, Н.И. Воропай, Д.В. Соколов // *Известия Российской академии наук. Энергетика.* 2021. № 4. С. 4–23. DOI: 10.31857/S0002331021040026.
11. *Ahmed M.M. et al.* Modern advancements of energy storage systems integrated with hybrid renewable energy sources for water pumping application // *Engineering Science and Technology, an International Journal.* 2025. T. 62. С. 101967.
12. *Cruz I.S., Batista N.E., de Carvalho P.C.M.* Renewable Hybrid Systems for water pumping: a review // *IEEE Latin America Transactions.* 2022. T. 20. № 10. С. 2263–2274.
13. *Ибрагим Ахмед Ибрагим Мохамед.* Применение эволюционных алгоритмов для повышения эффективности гибридных систем электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Ибрагим Ахмед Ибрагим Мохамед [Место защиты: Национальный исследовательский Томский политехнический университет]. Томск, 2020. 22 с.
14. *Chen C. et al.* Enhancing Pumped Hydro Storage Regulation Through Adaptive Initial Reservoir Capacity in Multistage Stochastic Coordinated Planning // *Energies.* 2025. T. 18. № 11. С. 2707.
15. *Arnaoutakis G.E. et al.* Combined operation of wind-pumped hydro storage plant with a concentrating solar power plant for insular systems: a case study for the island of Rhodes // *Energies.* 2022. T. 15. № 18. С. 6822.
16. *Ibekwe E.C., Amadi H.N., Horsfall D.J.* Solar Pumped Hydro Turbine Storage System for Efficient Power Supply // *Int. J. Eng. & Modern Tech.* 2024. Vol. 10 (9). P. 94–106. Ibekwe E.C., Amadi H.N., Horsfall D.J. Solar Pumped Hydro Turbine Storage System for Efficient Power Supply.

17. Яштулов Н.А. Водородная энергетика возобновляемых источников тока / Н.А. Яштулов, М.В. Лебедева // Российский технологический журнал. 2017. Т. 5. № 3 (17). С. 58–73.
18. Зырянов В.М. Энергетические характеристики гибридной системы накопления электрической энергии / В.М. Зырянов, Г.Б. Нестеренко, Г.А. Пранкевич [и др.] // Энергия единой сети. 2018. № 6 (42). С. 34–43.
19. Соснина Е.Н. Повышение эффективности использования возобновляемых источников энергии в составе виртуальной электростанции на основе мультиагентного управления / Е.Н. Соснина, А.В. Шалухо, Н.И. Эрдил // Вестник ЧГУ. 2022. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-effektivnosti-ispolzovaniya-vozobnovlyaemyh-istochnikov-energii-v-sostave-virtualnoy-elektrostantsii-na-osnove> (дата обращения: 18.11.2025).
20. Sidorov D. et al. Toward zero-emission hybrid AC/DC power systems with renewable energy sources and storages: A case study from lake Baikal region // Energies. 2020. Т. 13. № 5. С. 1226.
21. Воропай Н.И. От плана ГОЭЛРО к глобальному электроэнергетическому интернету / Н.И. Воропай // Электричество. 2020. № 12. С. 10–13. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-12-10-13.