УДК 621.311+502.174.3(575.2)
DOI: 10.36979/1694-500X-2026-26-8-41-48

# ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ ВНЕДРЕНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В ЭНЕРГОСИСТЕМУ КЫРГЫЗСТАНА

***Ю.П. Симаков, В.А. Бородин***

*Аннотация.* Рассматриваются основные проблемы внедрения возобновляемых источников энергии в энергосистему Кыргызстана. Актуальность темы заключается в ускоренном развитии солнечных и ветровых электростанций в Кыргызстане. В рамках статьи были проанализированы такие последствия, возникающие после интеграции возобновляемых источников энергии, как снижение совокупной инерции энергосистемы; вынужденная разгрузка традиционных электростанций Кыргызстана; перегрузы межсистемных транзитных линий электропередач и снижение надежности электроснабжения; преобладание ведомых сетью инверторных преобразователей и их неспособность работать изолированно от остальной энергосистемы и проблемы концентрации возобновляемых источников энергии в одном энергоузле на примере Иссык-Кульской области. Так как развитие возобновляемых источников энергии в Кыргызстане находится на начальном уровне, данные проблемы должны быть учтены при последующем развитии энергетики Кыргызстана.

*Ключевые слова:* возобновляемые источники энергии; солнечная электростанция; ветровая электростанция; инвертор; инерция.

# КЫРГЫЗСТАНДЫН ЭНЕРГЕГИКАЛЫК СИСТЕМАСЫНА КАЙРА ЖАРАЛУУЧУ ЭНЕРГИЯ БУЛАКТАРЫН КИРГИЗҮҮДӨГҮ ПОТЕНЦИАЛДУУ КӨЙГӨЙЛӨРДҮ БААЛОО

***Ю.П. Симаков, В.А. Бородин***

*Аннотация.* Макалада Кыргызстандын энергетикалык системасына кайра жаралуучу энергия булактарын киргизүүдөгү негизги көйгөйлөр каралат. Теманын актуалдуулугу Кыргызстанда күн жана шамал электр станцияларынын тездетилген темп менен өнүгүп жаткандыгында. Макаланын алкагында кайра жаралуучу энергия булактарын интеграциялоодон кийин келип чыгуучу төмөнкүдөй кесепеттер талданат: энергетикалык системанын жалпы инерциясынын төмөндөшү; Кыргызстандын салттуу электр станцияларын кубаттуулугун азайтуу; тутумдар аралык транзиттик электр берүү чубалгыларынын ашыкча жүктөлүшү жана электр менен жабдуунун ишенимдүүлүгүнүн төмөндөшү; тармак тарабынан башкарылуучу инвертордук өзгөрткүчтөрдүн басымдуулук кылышы жана алардын энергетикалык системанын калган бөлүгүнөн бөлүнүп, обочолонгон абалда иштей албастыгы, ошондой эле Ысык-Көл облусунун мисалында кайра жаралуучу энергия булактарынын бир энергетикалык түйүнгө топтолуу көйгөйлөрү. Кыргызстанда кайра жаралуучу энергия булактарын өнүктүрүү баштапкы деңгээлде тургандыктан, бул көйгөйлөр өлкө энергетикасын андан ары өнүктүрүүдө сөзсүз түрдө эске алынышы керек.

*Түйүндүү сөздөр:* кайра жаралуучу энергия булактары; күн электр станциясы; шамал электр станциясы; инвертор; инерция.

## ASSESSMENT OF POTENTIAL CHALLENGES IN INTEGRATING RENEWABLE ENERGY SOURCES INTO POWER SYSTEM IN KYRGYZSTAN

***Yu.P. Simakov, V.A. Borodin***

*Abstract.* This article examines the main challenges associated with the integration of renewable energy sources into Kyrgyzstan's power system. The relevance of this topic lies in the rapid development of solar and wind power stations in Kyrgyzstan. The article analyses the consequences arising from the integration of renewable energy sources, such as a reduction in the overall inertia of the power system; the forced curtailment of Kyrgyzstan's conventional power stations; overloading of inter-system transmission lines and a reduction in the reliability of electricity supply; the prevalence of grid-tied inverters and their inability to operate in isolation from the rest of the power system; and the problem of the concentration of renewable energy sources in a single power hub, as illustrated by the example of the Issyk-Kul region. As the development of renewable energy sources in Kyrgyzstan is still in its early stages, these issues must be taken into account in the further development of Kyrgyzstan's energy sector.

*Keywords:* renewable energy sources; solar power station; wind power station; inverter; inertia.

**Введение.** В настоящее время в Кыргызской Республике наблюдается устойчивое развитие таких возобновляемых источников энергии (ВИЭ), как солнечные электростанции (СЭС) и ветровые электростанции (ВЭС) [1]. Значительный потенциал развития солнечной и ветровой энергетики создаёт предпосылки для широкого внедрения новых объектов генерации на базе ВИЭ в энергосистему страны.

Вместе с тем увеличение доли объектов ВИЭ сопровождается рядом технических вызовов, связанных с особенностями их работы. Так, в отличие от традиционных электростанций с синхронными генераторами, солнечные и ветровые электростанции подключаются к сети преимущественно через силовые преобразователи, то есть работают несинхронно с энергосистемой [2].

Кроме того, выработка электроэнергии объектами ВИЭ зависит от времени суток, погодных условий и времени года и характеризуется значительной неравномерностью [3].

Большинство современных объектов ВИЭ используют инверторы, работающие по принципу ведомых сетью (grid-following), требующие наличия внешнего источника напряжения и частоты [4].

Также следует учитывать, что ВИЭ, как правило, размещаются в районах с наиболее благоприятными природными условиями, что приводит к концентрации значительных объёмов генерации в отдельных узлах сети [5].

Актуальной задачей является оценка потенциальных проблем, возникающих при интеграции ВИЭ в энергосистему Кыргызской Республики, а также определение технических мероприятий, необходимых для обеспечения надёжной и устойчивой работы энергосистемы при увеличении доли генерации объектами ВИЭ.

***Влияние внедрения объектов ВИЭ на совокупную инерцию энергосистемы.*** Снижение инерции энергосистемы является одним из ключевых последствий увеличения доли ВИЭ генерации. Под инерцией энергосистемы понимается способность системы сопротивляться быстрому изменению частоты при возникновении небаланса между генерацией и потреблением. В традиционных энергосистемах данное свойство обеспечивается вращающимися массами синхронных генераторов за счет накопленной кинетической энергии [6]. В случае замещения синхронной генерации объектами ВИЭ, подключаемыми через силовые преобразователи, суммарная механическая инерция системы уменьшается [7]:

$$T_{j,ээс} = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_{j,i} \times S_i}{S_{ээс}}, \text{ с} \quad (1)$$

где $T_{j,i}$ – постоянная инерции i-го генерирующего объекта, с;

$S_i$ – номинальная мощность i-го генерирующего объекта, МВА;

n – число генерирующих объектов энергосистемы, шт.;

$S_{ээс}$ – полная мощность энергосистемы, которая равна сумме номинальных мощностей работающих агрегатов, МВА.

Так, снижение инерции энергосистемы приводит к ухудшению её способности противостоять внезапным возмущениям. При уменьшении инерции кинетической энергии вращающихся масс становится недостаточно для компенсации возникающего небаланса мощности, вследствие чего растет скорость изменения частот, в особенности при аварийных возмущениях [8].

***Последствия неравномерности генерации электроэнергии объектами ВИЭ.*** Генерация солнечных и ветровых электростанций зависит от метеорологических условий и времени суток. Вследствие этого генерируемая мощность характеризуется значительной изменчивостью и не всегда совпадает с графиком потребления электроэнергии.

Рост доли ВИЭ приводит к увеличению потребности в маневренных генерирующих мощностях, способных оперативно изменять свою нагрузку. Для обеспечения надёжной работы энергосистемы возникает необходимость поддержания дополнительных резервов активной мощности, что может приводить к снижению эффективности эксплуатации традиционных электростанций и увеличению эксплуатационных затрат [9].

В случае Объединенной энергосистемы Центральной Азии (ОЭС ЦА), являющейся энергодефицитной, небалансы активной мощности компенсируются за счет трехцепного транзита 500 кВ Север – Юг и Восток – Юг Республики Казахстан через генерацию на электростанциях Северного Казахстана и Российской Федерации. При этом, транзит Север – Юг и Восток – Юг уже работает на пределе своей пропускной способности. Так, при увеличении доли ВИЭ в ОЭС ЦА возникает угроза превышения уровня допустимых перетоков в период утреннего и вечернего максимума из-за несовпадения графиков генерации электроэнергии объектами ВИЭ и графиков нагрузок в энергосистеме. Перетоки по транзиту Север – Юг и Восток – Юг (Л-530, Л-532 ВЛ 500 кВ ПС “Агадырь” – ПС “ЮКГРЭС” – 1,2 и Л-539 ВЛ 500 кВ ПС “Семей” – ПС “Актогай”) за январь 2023 г. для вечернего максимума нагрузки показаны на рисунке 1 [10].

Дополнительно, учитывая большую разницу между генерацией ВИЭ в дневное время (максимальная выработка) и вечернее время (околонулевая выработка), возникают трудности для регулирования каскада ГЭС и ТЭЦ г. Бишкека. В ситуации, когда объем генерируемой мощности объектами ВИЭ начнет сравниваться с внутренним потреблением Кыргызстана, возникает необходимость останова всех традиционных электростанций и неплановой выдачи мощности в ОЭС ЦА. При этом следует учесть, что ТЭЦ г. Бишкека не подлежит останову в связи с обязательным несением тепловой и электрической нагрузки для г. Бишкека; Ат-Башинская ГЭС и Камбаратинская ГЭС-2 не подлежат останову в связи




Рисунок 1 – Перетоки по транзиту Север – Юг и Восток – Юг за январь 2023 г.

с малым объемом водохранилищ и их переполнением и, как следствие, необходимостью проведения холостых сбросов; Курпсайская ГЭС, Таш-Кумырская ГЭС, Шамалды-Сайская ГЭС и Уч-Курганская ГЭС не подлежат останову из-за необходимости поддержания нормально допустимых уровней напряжения на Юге Кыргызстана и в Ферганском энергоузле Республики Узбекистан. Останов каскада ГЭС приведет также к прекращению спусков воды с вышележащих водохранилищ, в особенности с Токтогульского водохранилища, а также к дефициту маневренной генерации в условиях преобладания тепловых электростанций в энергосистемах Узбекистана и Казахстана. Графики нагрузок энергосистемы Кыргызстана для зимнего и летнего режима 2025 г. на основании данных контрольных замеров показаны на рисунке 2.

Сценарий с максимальной дневной генерацией СЭС и ВЭС равной 2 ГВт показан на рисунке 3.

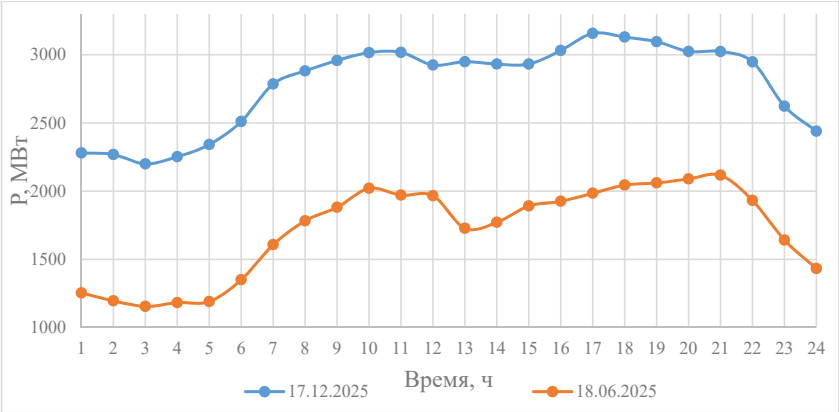



Рисунок 2 – Суточные графики нагрузок летнего и зимнего режимов энергосистемы Кыргызстана за 2025 г.

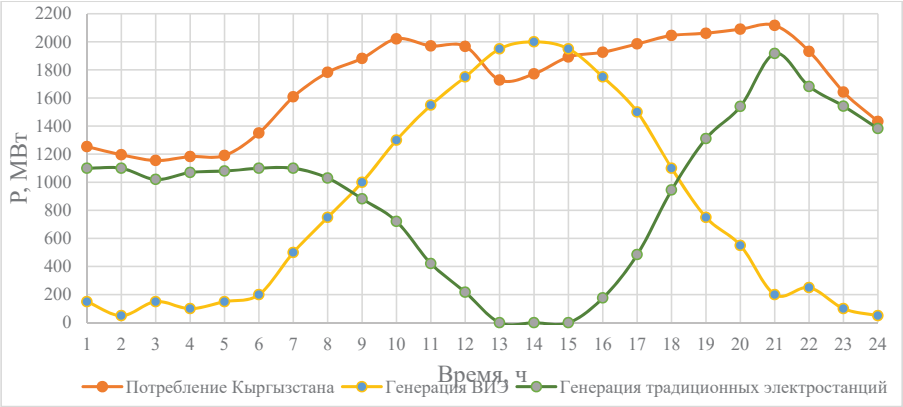



Рисунок 3 – Сценарий с максимальной генерацией ВИЭ 2 ГВт для летнего режима Кыргызстана

Согласно существующим техническим стандартам обязательным условием ввода в работу СЭС и ВЭС в энергосистему Кыргызстана является установка наряду с ними накопителей электроэнергии:

- не менее 50 % маневренных накопителей от установленной мощности и 100 % энергоемкости для ВЭС;
- не менее 50 % маневренных накопителей от установленной мощности и 200 % энергоемкости для СЭС [11].

Так, проект Иссык-Кульской СЭС-1 от компании ROX Energy Global (СЭС "РЭЦА") предусматривает установку в КРУ 35 кВ до 6 ячеек для работы аккумуляторных систем накопления энергии.

***Особенности работы различных типов инверторных преобразователей.*** Существует два подхода к управлению инверторными преобразователями при их параллельной работе с энергосистемой [12].

*Первый подход* реализуется в так называемых "ведомых сетью" (grid-following) инверторах. Такие преобразователи синхронизируются с уже существующей сетью, используя измеренные параметры, прежде всего напряжение и частоту. Для этого применяется система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), позволяющая определить фазу и частоту сети. В результате ведомый сетью инвертор может корректно работать только при наличии внешнего «опорного» напряжения, задаваемого синхронными генераторами. Следовательно, при высокой доле таких устройств энергосистема в целом становится менее устойчивой к возмущениям, а также зависимой от синхронных машин.

*Второй подход* основан на так называемых "ведущих сеть" (grid-forming) инверторах. В отличие от предыдущего типа, такие устройства способны самостоятельно формировать напряжение и частоту, фактически задавая электрический режим работы узла сети. По своему поведению они приближаются к синхронным генераторам и могут обеспечивать опорный сигнал для других устройств. В их системах управления реализуются алгоритмы регулирования частоты и напряжения, а также возможные аналоги инерционного отклика, что позволяет им поддерживать устойчивость в слабых или изолированных сетях.

На данный момент, инверторные преобразователи, устанавливаемые на солнечных и ветровых электростанциях в Кыргызстане, являются представителями ведомых сетью инверторов и являются полностью зависимыми от состояния энергосистемы. Дополнительно, режим их работы не предполагает генерацию реактивной мощности и её выдачу в энергосистему Кыргызстана. Следовательно, на баланс реактивной мощности в основном влияют генерируемая зарядная мощность на строящихся до объектов ВИЭ ЛЭП и потребляемая трансформаторами реактивная мощность.

***Последствия концентрации значительных объемов ВИЭ генерации в отдельных энергоузлах.*** Наиболее привлекательным регионом Кыргызстана для развития ВИЭ, в особенности солнечной энергетики, является Иссык-Кульская область [13]. Только по Иссык-Кулю выдано технических условий на подключение объектов ВИЭ суммарной мощностью свыше 5 ГВт [14]. Наименования объектов ВИЭ, их мощности, а также их точки подключения к энергосистеме Кыргызстана приведены в таблице 1.

Иссык-Кульская область связана с остальной энергосистемой Кыргызстана по двум ВЛ 220 кВ "Кемин – Иссык-Кульская-1, 2" выполненными сталеалюминевыми проводами сечением 300 мм$^2$ и одной ВЛ 110 кВ "Иссык-Кульская – Кочкор" выполненной сталеалюминевыми проводами сечением 185 мм$^2$. Большинство объектов ВИЭ планируют подключаться к шинам 220 кВ ПС "Иссык-Кульская". Сборные шины подстанции выполнены сталеалюминевым проводом сечением 2 × 630 мм$^2$ с допустимой токовой нагрузкой 2100 А, что для 220 кВ будет равняться 800 МВА, т. е. требуется обязательная реконструкция подстанции с увеличением сечения сборных шин, замена коммутационной аппаратуры и измерительных трансформаторов тока.

Даже учитывая лишь наиболее вероятные к подключению и действующие объекты ВИЭ при существующей схеме электрических сетей происходит перегрузка по току ВЛ "Кемин – Иссык-Кульская" при перетоке 817 МВт (2114 А) в сторону ПС "Кемин" в летнем режиме с максимальной дневной

Таблица 1 – Планируемые к подключению и действующие солнечные и ветровые электростанции в Иссык-Кульской области

| Наименование | Мощность, МВт | Точка подключения |
|---|---|---|
| СЭС Бишкек Солар (СЭС Тору-Айгыр) | 300 | СШ 220 кВ ПС “Иссык-Кульская” |
| СЭС РЭЦА (Иссык-Кульская СЭС-1) 1-й этап (действующая) | 150 | СШ 110 кВ ПС “Иссык-Кульская” СШ 110 кВ ПС “Чолпон-Ата” |
| СЭС РЭЦА (Иссык-Кульская СЭС-1) 2-й этап | 450 | СШ 220 кВ ПС “Иссык-Кульская” |
| СЭС РЭЦА (Иссык-Кульская СЭС-1) 3-й этап | 1300 | СШ 500 кВ ПС “Балыкчы” |
| СЭС Фортис Кей Джи | 400 | СШ 220 кВ ПС “Иссык-Кульская” |
| СЭС Кыргыз Пауэр | 250 | СШ 220 кВ ПС “Иссык-Кульская” |
| СЭС Балыкчы Грин Энерджи | 150 | ВЛ 110 кВ “Иссык-Кульская-Чолпон-Ата-1,2” |
| СЭС Кун-Булагы | 50 | ВЛ 110 кВ “Иссык-Кульская-Чолпон-Ата-1,2” |
| СЭС Солар Энерджи | 300 | СШ 220 кВ ПС “Иссык-Кульская” |
| СЭС Чайна Хуанаг Груп | 500 | СШ 220 кВ ПС “Балыкчы” |
| СЭС CPID & CR20G | 1000 | СШ 220 кВ ПС “Балыкчы” |
| ВЭС Нова Винд | 100 | ВЛ 110 кВ “Иссык-Кульская-Кочкор” |
| ВЭС Метрум Кей Джи | 300 | СШ 110 кВ ПС “Иссык-Кульская” СШ 220 кВ ПС “Кемин” |
| Итого: | 5250 | - |

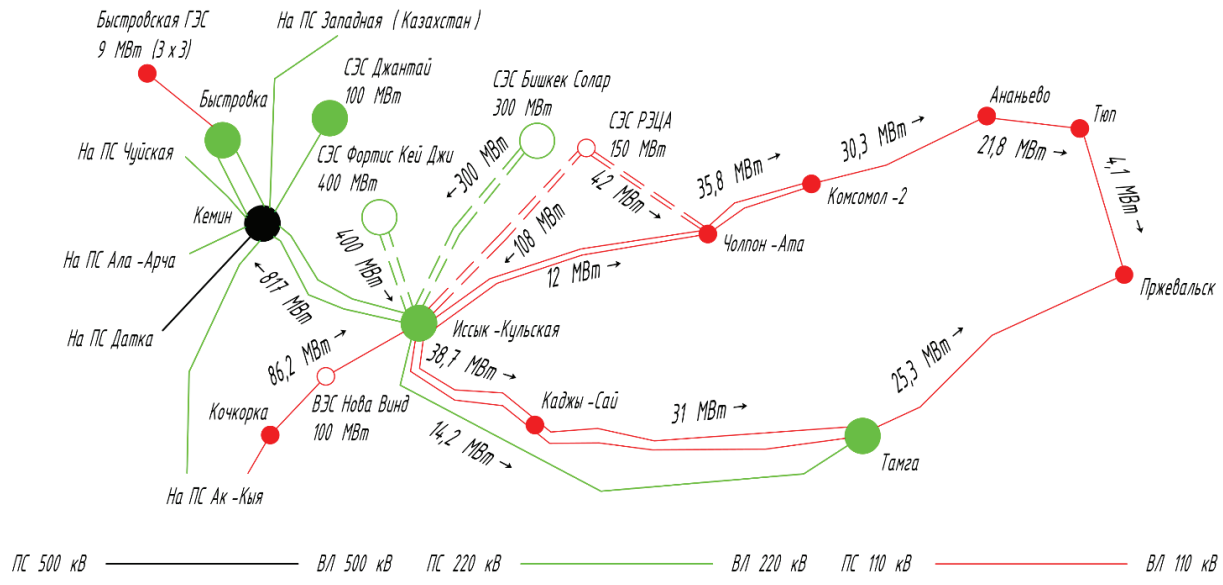



Рисунок 4 – Результаты расчета установившегося режима для летней максимальной генерации на объектах ВИЭ

генерацией СЭС и ВЭС. Результаты расчета установившегося режима для летней максимальной генерации на объектах ВИЭ показаны на рисунке 4.

При этом, даже строительство ВЛ 500 кВ “Кемин – Балыкчы” и новой ПС 500 кВ “Балыкчы” [15] не позволит осуществить выдачу всей генерируемой мощности из Иссык-Кульской области в остальную энергосистему Кыргызстана в силу ограничения пропускной способности сечения 110–500 кВ по условиям токовой нагрузки и статической апериодической устойчивости согласно результатам исследования интеграции ВИЭ в энергосистему Кыргызстана, проведенного в рамках проекта USAID “Энергетика Центральной Азии” с целью оценки влияния ВИЭ на работу системы и электрическую сеть Кыргызстана [16].

**Выводы.** Таким образом, интеграция объектов ВИЭ в энергосистему Кыргызстана несет за собой ряд таких негативных последствий, как снижение совокупной инерции энергосистемы и, как следствие, ускорение протекания переходных процессов; проблемы, вызванные применением ведомых сетью инверторов, из-за их неспособности работать изолированно от энергосистемы и перегрузы межсистемных транзитных линий электропередач как из-за неравномерности генерации электроэнергии объектами ВИЭ, так и из-за их концентрации в отдельных энергоузлах.

Так, существующая схема электрических сетей не позволяет осуществлять выдачу всей мощности из Иссык-Кульской области. Частичным решением для выдачи до 2 ГВт мощности в энергосистему Кыргызстана является строительство ЛЭП 500 кВ “Кемин – Балыкчы” и новой подстанции 500 кВ “Балыкчы” либо расширение подстанции 220 кВ “Иссык-Кульская” со строительством распределительного устройства 500 кВ.

Для выдачи всей мощности с объектов ВИЭ в энергосистему Кыргызстана требуется масштабное развитие сетей 220–500 кВ, а также развитие высоковольтных передач на постоянном токе [17].

Поступила: 15.07.2026; рецензирована: 29.07.2026; принята: 31.07.2026.

***Литература***

1. Оценка готовности к возобновляемой энергетике: Кыргызская Республика, Международное агентство по возобновляемым источникам энергии, Абу-Даби. IRENA 2022. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Dec/IRENA_RRA_Kyrgyz_Republic_2022_RU.pdf (дата обращения: 21.06.2026).
2. *Воропай Н.И.* Направления и проблемы трансформации электроэнергетических систем / Н.И. Воропай // Электричество. 2020. № 7. С. 12–21.
3. Renewables 2025, IEA, Paris. URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/76ad6eac-2aa6-4c55-9a55-b8dc0dba9f9e/Renewables2025.pdf (дата обращения: 21.06.2026).
4. *Samanta S., Yang B., Seo G-S.* Stability Analysis of Power Systems with High Penetration of State-of-the-Art Inverter Technologies // Energies. 2025; 18(14):3645. URL: https://doi.org/10.3390/en18143645 (дата обращения: 21.06.2026).
5. *Moore P., Alimi O.A., Abu-Siada A*. A Review of System Strength and Inertia in Renewable-Energy-Dominated Grids: Challenges, Sustainability, and Solutions // Challenges. 2025; 16 (1):12. URL: https://doi.org/10.3390/challe16010012 (дата обращения: 21.06.2026).
6. *Пасека В.А.* Анализ влияния интеграции солнечной электростанции на совокупную инерцию энергосистемы / В.А. Пасека // Международный научно-исследовательский журнал. 2025; 4(154). URL: https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.82 (дата обращения: 22.06.2026).
7. *Беляев А.Н.* Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах: учебное пособие / А.Н. Беляев [и др.]. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 149 с.
8. *Zhang Y.* Impact of Solar Power Integration on Power System Inertia / Y. Zhang [et al.] // Energy Conversion and Management. 2022. Vol. 245. P. 114–130.
9. *Kroposki B.* Integrating high levels of variable renewable energy into electric power systems // J. Mod. Power Syst. Clean Energy. 2017; 5; 831–837. URL: https://doi.org/10.1007/s40565-017-0339-3 (дата обращения: 23.06.2026).
10. *Винокуров Е.* Энергетика Центральной Азии: модернизация энергетического сектора и энергопереход / Е. Винокуров, А. Ахунбаев, Д. Кабылбаев [и др.] // Доклад 26/4. Алматы: Евразийский банк развития.

2026. URL: https://eabr.org/upload/EDB_2026_Power%20sector%20of%20CA_Report_RU.pdf (дата обращения: 24.06.2026).
11. СО 22862713-04-27.3-2022. Технические требования к объектам генерации на базе ветроэнергетических установок, фотоэлектрических солнечных модулей и их групп. Бишкек: ОАО «НЭС Кыргызстана», 2022. 35 с.
12. *Li Y., Gu Y. and Green T.C*. Revisiting Grid-Forming and Grid-Following Inverters: A Duality Theory, in IEEE Transactions on Power Systems. 2022. Vol. 37, No. 6. P. 4541–4554, Nov. DOI: 10.1109/TPWRS.2022.3151851.
13. *Андаева З.Т.* Анализ эффективности использования альтернативных источников энергии в Кыргызской Республике / З.Т. Андаева, М.С. Элчиева, Ш.И. Тургунбаев // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2025. № 3.
14. Кыргызстан развивает проекты солнечной и ветровой энергетики мощностью более 5,4 Гвт, – замминистра энергетики. URL: https://day.kg/exclusive/27918-kyrgyzstan-razvivaet-proekty-solnechnoj-i-vetrovoj-jenergetiki-moschnostju-bolee-54-gvt-zamministra-jenergetiki.html (дата обращения 18.08.2026).
15. Межсистемная линия Кемин – Балыкчы. Европейский банк реконструкции и развития. URL: https://www.ebrd.com/home/work-with-us/projects/psd/55367.html (дата обращения: 25.06.2026).
16. USAID. Power Central Asia Activity: Annual Report 2023. – Tashkent: United States Agency for International Development, 2022. URL: https://powercentralasia.org/wp-content/uploads/2024/01/PCA-Public-Annual-Report-2023_v2_comp.pdf (дата обращения: 25.06.2026).
17. *Abdulrahman Alassi, Santiago Bañales, Omar Ellabban, Grain Adam, Callum MacIver.* HVDC Transmission: Technology Review, Market Trends and Future Outlook // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 112. P. 530–554. ISSN 1364-0321. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119302837 (дата обращения: 26.06.2026).