



# Qayta tiklanadigan energiya manbalarini energiya tizimiga integratsiyalash xususiyatlari

Nigorabonu U. Ishanxojaeva

doktorant (PhD), Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; <https://orcid.org/0000-0001-7850-9446>

**Dolzarbligi:** qayta tiklanuvchi energiya manbalarini (QTEM) O'zbekiston energetika tizimiga integratsiya qilish mamlakat rivojlanishi uchun strategik ahamiyatga ega. QTEM integratsiya uchun infratuzilmani modernizatsiya qilish, shu jumladan "aqli tarmoqlar" (Smart Grid)ni rivojlantirish talab etiladi. Bu zamonaviy boshqaruv texnologiyalari, energiyani saqlash tizimlari va monitoringni raqamlashtirishni rag'batlantirib, umumiy energiya samaradorligini oshiradi. Shu sababli, QTEMni joriy etish nafaqat texnik muammolar, balki ekologiya, energetika xavfsizligi, iqtisodiy rivojlanish va infratuzilmani modernizatsiya qilish sohasidagi strategik vazifalar bilan belgilanadi. Ularni muvaffaqiyatli hal etish mamlakatning barqaror kelajagi garovidir.

**Maqsad:** qayta tiklanuvchi energiya manbalarini integratsiyasining quvvat oqimi va elektr energiyasi sifatiga ta'sirini tahlil qilish hamda ushbu tahlil asosida ixtisoslashgan dasturiy ta'minot imkoniyatlari va cheklovlarini baholash.

**Usullar:** ilmiy-texnik adabiyotlar, xalqaro standartlar (IEEE, IEC), mavjud matematik yondashuvlar va dasturiy vositalar tahlilidan foydalaniladi.

**Natijalar:** ilmiy-texnik adabiyotlarni tahlil qilish QTEMni zamonaviy energiya tizimlariga integratsiyalashda yuzaga keladigan asosiy muammolarni tizimlashtirish va umumlashtirish imkonini berdi. Olingan natijalar ilmiy hamjamiyatning mazkur masala bo'yicha umumiy nuqtai nazarini aks ettiradi. Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, QTEM integratsiyasining chuqur tahlili uchun DIGSILENT PowerFactory, ETAP va PSS/E kabi kompleks dasturiy vositalar qo'llaniladi. Shu bilan birga, ko-simulyatsiyadan (masalan, MATLAB/Simulink) foydalanish tendentsiyasi kuzatilmogda, bu esa boshqaruvning yangi algoritmlarini aniqroq modellashtirish va ishlab chiqish imkonini beradi.

**Kalit so'zlar:** qayta tiklanuvchi energiya manbalari (QTEM), taqsimlangan generatsiya, integratsiya, quvvat oqimlarini hisoblash, aqli tarmoqlar (Smart Grid).

## Особенности интеграции возобновляемых источников энергии в энергосистему

Нигорабону У. Ишанходжаева

Докторант (PhD), Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, Ташкент, 100095, Узбекистан; <https://orcid.org/0000-0001-7850-9446>

**Актуальность:** интеграция возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергосистему Узбекистана имеет важное значение для развития страны. Для интеграции ВИЭ необходима модернизация инфраструктуры, включая развитие «умных сетей» (Smart Grid). Это стимулирует внедрение современных технологий управления, систем накопления энергии и цифровизацию мониторинга, повышая общую эффективность энергосектора. Таким образом, внедрение ВИЭ обусловлено не только техническими вызовами, но и стратегическими задачами в области экологии, энергетической безопасности, экономического развития и модернизации инфраструктуры, успешное решение которых является залогом процветающего будущего страны.

**Цель:** провести анализ влияния интеграции возобновляемых источников энергии на перетоки мощности и качество электроэнергии в энергосистеме. На основе этого анализа оценить возможности и ограничения специализированного программного обеспечения.

**Методы:** используется научно-техническая литература, международные стандарты (IEEE, IES), анализ существующих математических подходов и программных средств.

**Результаты:** анализ научно-технической литературы позволил систематизировать и обобщить ключевые вызовы, возникающие при интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в современные энергосистемы. Полученные результаты отражают общую точку зрения научного сообщества по рассматриваемой проблеме. Исследование показывает, что для детального анализа интеграции ВИЭ используются комплексные программные средства, такие как DIGSILENT, PowerFactory, ETAP и PSS/E. При этом наблюдается тенденция к использованию ко-симуляции (например, MATLAB/Simulink), что позволяет более точно моделировать и разрабатывать новые алгоритмы управления.

**Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии (ВИЭ), распределенная генерация, интеграция, расчёт потоков мощности, интеллектуальные сети (Smart Grid).

**For citation:** Ishankhodjaeva N.U.

Peculiarities of Integrating Renewable Energy Sources into the Power System. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2025, no. 4, pp. 365-370.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.18693769>

769

Received: 04.04.2025

Revised: 18.04.2025

Accepted: 10.07.2025

Published: 27.12.2025

**Copyright:** © Nigorabonu U. Ishankhodjaeva, 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/>)



# Peculiarities of Integrating Renewable Energy Sources into the Power System

Nigorabonu U. Ishankhodjaeva

Doctoral student (PhD), Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, 100095, Uzbekistan;  
<https://orcid.org/0000-0001-7850-9446>

**Relevance:** the integration of renewable energy sources (RES) into the power system of Uzbekistan is of strategic importance for the country's development. The integration of RES requires a comprehensive modernization of infrastructure, including the development of "Smart Grids." This stimulates the adoption of modern management technologies, energy storage systems, and the digitalization of monitoring, thereby increasing the overall efficiency of the energy sector. Thus, the integration of RES is driven not only by technical challenges but also by strategic objectives in the fields of ecology, energy security, economic development, and infrastructure modernization. Their successful resolution is the key to a prosperous future for the country.

**Aim:** to analyze the influence of integrating renewable energy sources on power flows and power quality in the energy system. Based on this analysis, the goal is to evaluate the capabilities and limitations of specialized software.

**Methods:** the following methods were used: analysis of scientific and technical literature, international standards (IEEE, IEC), and existing mathematical approaches and software tools.

**Results:** the analysis of scientific and technical literature allowed for the systematization and generalization of the key challenges that arise when integrating renewable energy sources (RES) into modern power systems. The results obtained reflect the general consensus of the scientific community on this issue. Studies show that for a detailed analysis of RES integration, complex software tools such as DIGSILENT Power Factory, ETAP, and PSS/E are used. There is also a growing trend toward using co-simulation (for example, MATLAB/Simulink), which allows for more accurate modeling and the development of new control algorithms.

**Keywords:** renewable Energy Sources (RES), distributed generation, integration, power flow calculation, smart grids.

## 1. Введение (Introduction)

В мировой энергетике происходят существенные изменения, она трансформируется весьма динамично. Уходит в прошлое классическая энергосистема, объединяющая несколько крупных электростанций и централизованную систему передающих и распределённых сетей. При этом переход к новой системе экологического энергосбережения с использованием большого количества возобновляемых источников в комбинации с накопителями энергии и крупными электростанциями для обеспечения стабильного электроснабжения, требует совершенно иного подхода. [1]. Современные тенденции в развитии электроэнергетики характеризуются активным внедрением возобновляемых источников энергии (ВИЭ), таких как солнечная и ветровая генерация. Это обусловлено как глобальными экологическими вызовами, так и необходимостью обеспечения топливно-энергетического баланса. Интеграция ВИЭ в энергосистему представляет собой сложный многокомпонентный процесс, затрагивающий технические, экономические и регуляторные аспекты работы сети.

Особенность возобновляемых источников заключается в их переменности и непредсказуемости выработки, что вызывает колебания напряжения, нестабильность частоты и сложности при управлении режимами энергосистемы [2,3]. При высоком уровне проникновения ВИЭ возрастают риски нарушений устойчивости сети, в том числе при перераспределении потоков мощности и недостатке резервных мощностей [4]. Это требует разработки новых подходов к планированию, прогнозированию, управлению и автоматизации энергосистем, включая внедрение интеллектуальных сетей (Smart Grids) [5].

Для стран с растущим спросом на электроэнергию, учитывая географическое расположение и климат Узбекистана, вопросы интеграции ВИЭ приобретают особую актуальность [6]. Согласно Стратегии развития электроэнергетики Республики Узбекистан до 2030 года, доля ВИЭ должна достигнуть 25–30% в общем энергобалансе [7]. Это ставит перед исследователями и инженерами задачу адаптации существующих сетей к новым условиям генерации и разработки соответствующих алгоритмов управления, основанных на международных стандартах, таких как IEEE 1547, IEC 61850 и других [8].

Данная работа направлена на рассмотрение ключевых технических проблем интеграции ВИЭ в энергосистему, анализ существующих подходов и разработку алгоритмов, учитывающих особенности распределённой генерации и потоков мощности в условиях Узбекистана

## 2. Методы и материалы (Methods and materials)



Согласно Постановлению Президента Республики Узбекистан, от 02.12.2022 г. № ПП-436 “О мерах по повышению эффективности реформ, направленных на переход Республики Узбекистан на «зеленую» экономику до 2030 года”, планируется увеличение производственной мощности возобновляемых источников энергии до 15 ГВт и доведение их доли в общем объеме производства электрической энергии до более 30 процентов, а также повышение энергоэффективности в сфере промышленности не менее чем на 20 процентов [9].

Для достижения поставленной цели и всестороннего анализа влияния распределенной генерации ВИЭ на энергосистему в работе применён комплексный подход, сочетающий теоретические и численные методы исследования. Исследование основано на обзоре и систематизации данных из научно-технической литературы, а также на анализе международных стандартов, в частности IEEE (Институт инженеров электротехники и электроники) и IEC (Международная электротехническая комиссия). Такой подход позволил сформировать теоретическую базу, выявить ключевые проблемы, связанные с перетоками мощности и качеством электроэнергии, и определить общепринятые методологии для их изучения [10].

Существующая энергосистема были спроектированы для однонаправленного потока мощности, однако присоединение возобновляемых источников энергии (ВИЭ) кардинально меняет эту парадигму, создавая двунаправленные перетоки. Эта новая особенность функционирования энергосистемы порождает серьёзные технические проблемы. Для получения достоверных данных и последующего анализа на конкретных объектах в исследовании выявлены как численные методы, так и современные программные средства. Такой комплексный подход позволяет не только выявить проблемы, но и выработать эффективные решения для обеспечения стабильной и надёжной работы энергосистемы. Для расчетов перетоков мощности в энергосистеме применяются различные математические методы. Наиболее распространенными являются: метод Ньютона-Рафсона, Gauss-Seidel, метод фазов напряжения (*фазор – вращающийся на комплексной плоскости вектор*). Для практической реализации расчётов и симуляции будут использованы следующие программные комплексы:

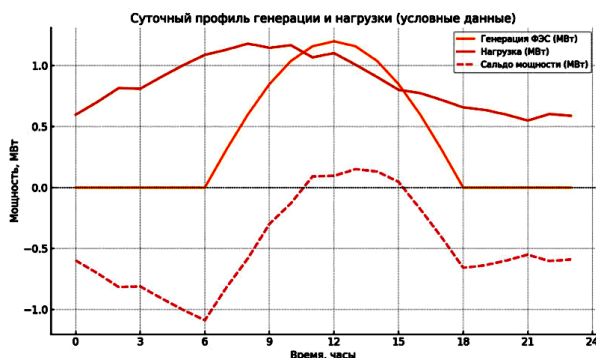
- DIGSILENT Power Factory: Применён для комплексного моделирования энергосистемы, расчёта установившихся режимов и анализа влияния ВИЭ на стабильность сети.
- ETAP: Использован для проведения гармонического анализа и оценки качества электроэнергии в соответствии со стандартами.
- MATLAB/Simulink: Будет задействован для моделирования динамических процессов и разработки алгоритмов управления, что позволит более детально изучить поведение инверторов ВИЭ.

Полученные результаты будут подвергнуты сравнительному анализу по следующим критериям:

- Сопоставление математических методов: Оценка точности и скорости сходимости методов Ньютона-Рафсона и Гаусса-Зейделя при разных сценариях работы сети.
- Оценка программных средств: Сравнение функциональных возможностей, удобства использования и точности расчётов DIGSILENT PowerFactory и ETAP для решения поставленных задач.
- Анализ результатов: Сопоставление полученных данных с нормативными требованиями к качеству электроэнергии (например, IEEE 519) для выявления нарушений и разработки рекомендаций [10].

### 3. Результаты и обсуждение (Results and discussion)

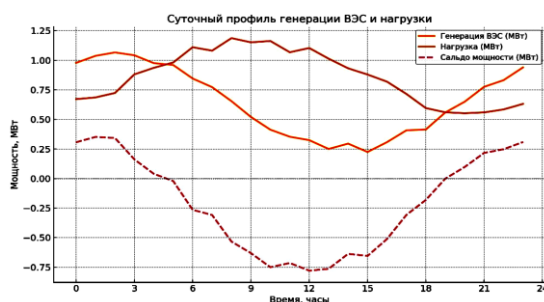
Построенные графики основаны на усреднённых значениях и представляют собой модель идеального объекта, используемую для иллюстрации типичных суточных профилей генерации и нагрузки, отражающие суточные профили генерации от солнечных (ФЭС) и ветровых (ВЭС) электростанций, а также сравнение их работы с графиком нагрузки. Полученные результаты позволяют провести анализ соответствия между выработкой энергии и спросом, а также определить потенциальные проблемы и пути повышения надёжности энергоснабжения при интеграции ВИЭ.



**Рис.1.** Суточная генерация ФЭС и график нагрузки  
**Fig.1.** Daily generation of SES and load

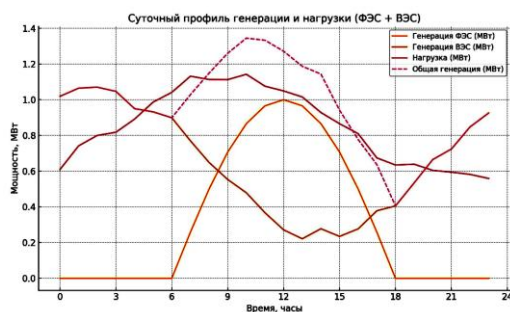
**Генерация ФЭС и нагрузка.** Как видно из первого графика, солнечная генерация имеет чётко выраженный дневной пик, достигающий максимума в период с 10:00 до 15:00. В утренние и вечерние часы генерация отсутствует, что приводит к несоответствию профиля выработки и потребления. Подобные характеристики солнечных станций подтверждают ранее выявленные проблемы по обеспечению баланса в системах с высоким уровнем ФЭС [11,12]. В пиковые часы генерации возможен избыток мощности, в то время как в вечерние и утренние часы наблюдается её дефицит.

**Генерация ВЭС и нагрузка.** Второй график иллюстрирует работу только ветровых электростанций. Хотя генерация сохраняется в течение суток, её профиль также не полностью соответствует нагрузке, особенно в вечерние часы. Это подчёркивает необходимость внедрения систем накопления энергии (СНЭ) и механизмов управления нагрузкой [13]. Особенно актуально это в контексте регионов с переменным ветровым потенциалом, как, например, южные области Узбекистана [7].



**Рис.2.** Суточная генерация ВЭС и график нагрузки  
**Fig.2.** Daily generation of WES and load

**Совмещённая генерация ФЭС и ВЭС.** На третьем графике представлена совместная работа ФЭС и ВЭС, демонстрирующая сглаживание суточных колебаний. Ветровые установки, активные в ночные и утренние часы, частично компенсируют спад солнечной генерации. Совокупный профиль приближается к потребительскому, что снижает потребность в резервах и повышает стабильность системы [14]. Такой гибридный подход получил широкое распространение в проектах Smart Grid и распределённой генерации.



**Рис.3.** Суточная генерация ФЭС, ВЭС и график нагрузки  
**Fig.3.** Daily generation of SES, WES and load



На основе анализа можно сделать следующие выводы:

- Использование только одного типа ВИЭ не обеспечивает полное покрытие суточной нагрузки без резервов.
- Совмещённая генерация ФЭС и ВЭС позволяет достичь более сбалансированного графика.
- Суточные колебания ВИЭ требуют применения СНЭ и интеллектуальных систем управления.
- Для устойчивой работы сетей необходимо учитывать влияние ВИЭ на напряжение, частоту и перетоки мощности [8].

#### 4. Заключение (Conclusion)

Рост использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ), таких как солнечные фотоэлектрические станции (ФЭС) и ветряные электростанции (ВЭС), оказывает значительное влияние на архитектуру и режимы работы современных энергосистем. В данной работе были рассмотрены особенности генерации энергии от ФЭС и ВЭС на суточном интервале, а также их взаимодействие с нагрузкой.

Построенные графики позволили визуализировать типичное распределение генерации ФЭС, характеризующееся пиковой выработкой в дневное время, и ВЭС — с более переменным характером выработки. Сравнение графиков показало, что генерация от ВИЭ не всегда совпадает с потребительской нагрузкой, что порождает вызовы в обеспечении баланса мощности и стабильности напряжения.

Интеграция ВИЭ требует развития интеллектуальных систем управления, систем хранения энергии и эффективных алгоритмов прогнозирования. Кроме того, необходимо учитывать влияние переменности ВИЭ на перетоки мощности и качество электроэнергии, особенно в условиях децентрализованного производства.

Таким образом, успешная интеграция ВИЭ в энергосистему невозможна без комплексного подхода, включающего технические, организационные и экономические меры, направленные на повышение гибкости и устойчивости энергетической инфраструктуры.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аллаев, К.Р. (2021). *Современная энергетика и перспективы ее развития*. –Ташкент: Издательско-полиграфический дом «Фан ва технологиялар». – 8 с.
2. Ackermann, T., Anderson, G., Soder, L. (2001) Distributed Generation: A Definition. *Electric Power System Research*, 57, 195-204. [https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(01\)00101-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(01)00101-8).
3. Lopes, J.A.P., Hatziaegyriou, N., Mutale, J., Djapic, P., & Jenkins, N. (2007). Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities. *Electric Power Systems Research*, 77(9), 1189–1203. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2006.08.016>.
4. Кундур, П. Устойчивость и управление энергосистемой / П. Кундур. – Нью-Йорк: Макгроу-Хилл, 1994. – 1176 с.
5. Fang, X., Misra, S., Xue, G. and Yang, D. (2012) Smart Grid—The New and Improved Power Grid: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 14, 944-980. <https://doi.org/10.1109/SURV.2011.101911.00087>.
6. Ишанходжаева, Н.У. (2024). «Оценка потенциала комплекса солнечной и ветровой энергии в Республике Узбекистан». //Проблемы энергетики и ресурсосбережения, № 87, 521-528.
7. Министерство энергетики Республики Узбекистан. (2020). Стратегия развития электроэнергетического сектора Узбекистана до 2030 года.
8. Стандарт IEEE 1547-2018. Стандарт по взаимосвязи и совместимости распределенных энергетических ресурсов с соответствующими интерфейсами электрических систем.
9. Указ Президента Республики Узбекистан от 02.12.2022, № УП-436. <https://lex.uz/ru/docs/6303233>.
10. Стандарт IEEE 1547-2018. Стандарт по взаимосвязи и совместимости распределенных энергетических ресурсов с соответствующими интерфейсами электрических систем. <https://web.nit.ac.ir/~shahabi.m/M.Sc%20and%20PhD%20materials/DGs%20and%20MicroGrids%20Course/Standards/IEEE%20Std%201547/IEEE%20Std%201547%E2%84%A2-2018.pdf>.
11. Лю, Ю. Оптимальное планирование гибридных систем «ветер–солнце–аккумулятор» в распределительных сетях / Ю. Лю, Ц. Чжан, М. Шен, Х. Ван // *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. – 2021. – Т. 12, № 1. – С. 508–519. – DOI: 10.1109/TSTE.2020.2997341.



12. International Energy Agency (IEA). (2023). Renewables 2023: Global Status Report. <https://www.iea.org/reports/scaling-up-private-finance-for-clean-energy-in-emerging-and-developing-economies>.
13. Голуб И.А., Николайчук Д.Г. Интеграция возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в традиционные системы электроснабжения //Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. 2024. №107. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/integratsiya-vozobnovlyaemyh-istochnikov-energii-vie-v-traditsionnye-sistemy-elektrosnabzheniya> (дата обращения: 01.08.2025). естественные и экономические науки. 2024. №107. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/integratsiya-vozobnovlyaemyh-istochnikov-energii-vie-v-trad-e>.
14. IPCC. (2023). Climate Change 2023: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_SPM.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf).

## REFERENCES

- Allaev, K.R. (2021). Modern Energy and Prospects for its Development. – Tashkent: Fan va texnologiyalar nashriyot-matbaa uyi. - 8 p. (In Russ).
- Ackermann, T., Andersson, G., & Söder, L. (2001). Distributed generation: a definition. *Electric Power Systems Research*, 57(3), 195–204.
- Lopes, J. A. P., Hatziargyriou, N., Mutale, J., Djapic, P., & Jenkins, N. (2007). Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities. *Electric Power Systems Research*, 77(9), 1189–1203.
- Kundur, P. *Power System Stability and Control* / P. Kundur. –New York: McGraw-Hill, 1994. –1176 p.
- Fang, X., Misra, S., Xue, G., & Yang, D. (2012). Smart grid – The new and improved power grid: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 14(4), 944–980.
- Ishankhodjaeva, N.U. (2024). "Assessment of the potential solar and wind energy complex in the Republic of Uzbekistan". *Problems of energy and resource saving*, No. 87, 521-528. (In Russ).
- Ministry of Energy of the Republic of Uzbekistan. (2020). *Uzbekistan's Electricity Sector Development Strategy until 2030*. (In Russ).
- IEEE Standard 1547-2018. Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces.
- Presidential Decree of the Republic of Uzbekistan, dated 02.12.2022, No. PP-436. (In Russ).
- IEEE Std 1547-2018. Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces.
- Liu, Y., et al. (2021). "Optimal Scheduling of Wind–Solar–Battery Hybrid Systems in Distribution Networks". *IEEE Transactions on Sustainable Energy*.
- International Energy Agency (IEA). (2023). Renewables 2023: Global Status Report.
- Golub, Ilya A., & Nikolaichuk, Denis G. (2024). Integration of Renewable Energy Sources (RES) into Traditional Power Supply Systems. *Bulletin of the Amur State University. Series: Natural and Economic Sciences*, (107). (In Russ).
- IPCC. (2023). Climate Change 2023: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_SPM.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf).