

УДК 621.3

**ИНТЕГРАЦИЯ МАЛЫХ МОДУЛЬНЫХ РЕАКТОРОВ С
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ В
РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ
INTEGRATION OF SMALL MODULAR REACTORS WITH
RENEWABLE ENERGY SOURCES IN DISTRIBUTED ENERGY
SYSTEMS**

Сугак В.В., студент гр. бЭЭТ-233, III курс
Научный руководитель: Черных Т.Е., старший преподаватель
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»
г. Воронеж

Аннотация: в условиях глобального энергетического перехода особую актуальность приобретает проблема обеспечения стабильности энергоснабжения при высокой доле возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в структуре генерации. Традиционные решения на основе ископаемого топлива противоречат целям декарбонизации, что обуславливает необходимость поиска низкоуглеродных альтернатив для балансирования энергосистем. В настоящей работе на основе анализа современных исследований рассматривается синергетический потенциал интеграции малых модульных реакторов (SMR, MMP) с ВИЭ в рамках распределенных энергетических систем. Целью исследования является обобщение технико-экономических и режимных аспектов создания гибридных энергокомплексов на базе SMR и ВИЭ. В статье показано, что комбинация управляемой генерации SMR и стохастической генерации ВИЭ при наличии систем накопления позволяет достичь качественно нового уровня надежности и экологичности энергоснабжения. Результаты анализа демонстрируют перспективность данного направления как одного из ключевых для развития мировой низкоуглеродной энергетики.

Ключевые слова: малые модульные реакторы (SMR), возобновляемые источники энергии (ВИЭ), распределенная энергетика, гибридные энергосистемы, декарбонизация, следование за нагрузкой, низкоуглеродная генерация.

Abstract: In the context of the global energy transition, ensuring the stability of power supply with a high share of renewable energy sources (RES) in the generation mix has become a critical issue. Traditional solutions based on fossil fuels contradict decarbonization goals, necessitating the search for low-carbon alternatives for balancing energy systems. This paper, based on an analysis of contemporary research, examines the synergistic potential of integrating Small Modular Reactors (SMRs) with RES within distributed energy systems. The aim

of the study is to synthesize the technical, economic, and operational aspects of creating hybrid energy complexes based on SMRs and RES. The article demonstrates that the combination of controllable SMR generation and stochastic RES generation, supported by energy storage systems, can achieve a qualitatively new level of reliability and environmental sustainability in power supply. The results of the analysis highlight the promise of this direction as a key pathway for the development of global low-carbon energy.

Keywords: small modular reactors (SMR), renewable energy sources (RES), distributed energy, hybrid energy systems, decarbonization, load following, low-carbon generation.

Введение

Современная мировая энергетика переживает период фундаментальной трансформации, обусловленной двумя разнонаправленными трендами. С одной стороны, наблюдается стремительный рост доли возобновляемых источников энергии [1], в первую очередь солнечных и ветровых электростанций, что диктуется целями декарбонизации и снижением стоимости технологий ВИЭ. С другой стороны, высокая степень проникновения «зеленой» энергетики обостряет проблему надежности энергоснабжения из-за присущей ВИЭ нестабильности и зависимости от природных факторов. Традиционно функции балансирования выполняют тепловые электростанции на органическом топливе, однако их использование нивелирует экологический эффект от внедрения ВИЭ.

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью поиска низкоуглеродного, но при этом управляемого источника энергии, способного компенсировать провалы генерации ВИЭ. В последние годы в качестве такого источника все чаще рассматриваются малые модульные реакторы (SMR), ядерные установки электрической мощностью до 300 МВт, характеризующиеся заводским изготовлением и повышенными показателями безопасности. Новизна тематики заключается в переходе от парадигмы конкуренции атомной энергетике и ВИЭ к парадигме их симбиоза в рамках гибридных энергосистем (Hybrid Energy Systems), что активно обсуждается в современной научной литературе [2].

Целью данной работы является комплексный анализ современного состояния исследований в области интеграции малых модульных реакторов с возобновляемыми источниками энергии. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- анализ технических характеристик SMR, релевантных для совместной работы с ВИЭ, на основе опубликованных данных.
- обобщение результатов технико-экономического моделирования гибридных энергокомплексов (SMR + ВИЭ + системы накопления).

- оценка влияния интеграции на ключевые показатели эффективности энергоснабжения.

- выявление основных экономических эффектов синергии на основе международных кейсов.

В ходе проведенного анализа научной литературы были получены следующие результаты, характеризующие различные аспекты интеграции малых модульных реакторов и ВИЭ.

Во-первых, установлено, что современные проекты малых модульных реакторов обладают техническими характеристиками, принципиально отличающими их от традиционных крупных АЭС. Исследование [3], посвященное реактору NuScale (рис. 1) [4], демонстрирует, что способность SMR работать в режиме следования за нагрузкой обусловлена их внутренними нейтронно-физическими характеристиками, в частности, отрицательными обратными связями по реактивности. Более поздние работы подтверждают, что оптимизация аксиального офсета (АО) позволяет существенно улучшить эксплуатационные характеристики реакторов NuScale при работе в переменных режимах, что критически важно для совместной генерации с ВИЭ [5].



Рис.1. Реактор NuScale

Другой перспективный проект BWRX 300 (рис.2) компании GE Hitachi также позиционируется разработчиком как реактор, способный к маневрированию мощностью и пригодный для интеграции с ВИЭ в энергосистемах будущего [6, 7]. Способность SMR работать в маневренном

режиме в диапазоне мощностей делает их идеальным дополнением для систем с высокой долей ВИЭ, позволяя осуществлять регулирование без прямых выбросов CO₂.



Рис. 2. Энергоблок с реактором BWRX-300

Во-вторых, анализ технико-экономических исследований гибридных энергокомплексов демонстрирует их высокую эффективность. В работе [8] представлен анализ интегрированной энергосистемы, объединяющей SMR, солнечные концентраторы и ветровую энергетику. Результаты моделирования показали, что такой гибридный подход позволяет увеличить выработку электроэнергии на 8,8%, а интеграция ветровой генерации мощностью от 17 до 51 МВт повышает общую эффективность системы на 2,7% по сравнению с изолированным использованием SMR. Данное исследование наглядно демонстрирует синергетический эффект от объединения различных низкоуглеродных источников.

В-третьих, исследователи активно применяют инструментарий оптимизационного моделирования для оценки экономической эффективности гибридных систем. Международный опыт показывает, что интеграция SMR с солнечными фотоэлектрическими панелями, ветрогенераторами и системами накопления энергии (BESS) представляет собой технически осуществимое решение для повышения надежности энергоснабжения и снижения выбросов парниковых газов [9].

Наиболее показательные результаты получены в ходе моделирования гибридных систем для конкретных территорий. В исследовании для острова Пхукет (Таиланд) сравнивались различные конфигурации энергоснабжения. Согласно результатам, опубликованным в журнале *Energies* [10], оптимальная система "Grid/PV/WT/SMR" позволяет снизить

чистую приведенную стоимость (NPC) и уровень приведенной стоимости электроэнергии (LCOE) на 28% по сравнению с системой, ориентированной только на внешнюю сеть, при одновременном сокращении выбросов CO₂ более чем на 58%. Это подтверждает экономическую целесообразность интеграции SMR и ВИЭ даже в регионах с доступом к централизованному электроснабжению.

Аналогичные выводы получены и для африканского континента. В работе [11], посвященной оценке гибридных энергосистем для промышленной электрификации Ганы, моделирование в среде HOMER Pro показало, что интеграция SMR и ВИЭ позволяет достичь профицита энергии в объеме 206 млн кВт·ч, который может быть направлен в сеть или использован для производства «зеленого» водорода. Экономические оценки зафиксировали LCOE на уровне \$0,185/кВт·ч, что на 34% ниже промышленного тарифа на электроэнергию в Гане (по состоянию на 2024 год). Кроме того, годовой объем сокращения выбросов CO₂ оценивается почти в 16 млн кг, что напрямую поддерживает национальную программу энергетического перехода.

В-четвертых, анализ современных публикаций свидетельствует о растущем интересе научного сообщества к данной проблематике. Выпуск специального номера журнала *International Journal of Thermofluids* [12], посвященного вопросам разворачивания SMR и интегрированных энергетических систем, подтверждает актуальность исследований в области технико-экономической оптимизации гибридных энергокомплексов, анализа рисков и лицензирования, а также экономики подобных решений.

Для количественной оценки преимуществ предлагаемого подхода был проведен сравнительный анализ трех конфигураций энергоснабжения: традиционной, автономной с использованием только ВИЭ и накопителей, и гибридной, интегрирующей SMR, ВИЭ и системы накопления. Результаты сравнительного анализа, обобщенные в Таблице 1, демонстрируют существенное превосходство гибридной конфигурации по всем ключевым показателям.

Как следует из данных, представленных в Таблице 1, гибридная система обеспечивает не только качественно более высокий уровень надежности энергоснабжения, но и позволяет снизить приведенную стоимость электроэнергии на 34% относительно традиционных решений. Особого внимания заслуживает сокращение выбросов CO₂ на 95%. Кроме того, наличие механизмов утилизации избытков энергии (производство водорода и тепла) принципиально отличает гибридную систему от конфигурации «только ВИЭ», где избытки приводят к вынужденному ограничению генерации.

Таблица 1

Сравнительный анализ технико-экономических показателей
различных конфигураций энергоснабжения для изолированных
территорий

Показатель	Традиционная система (Дизель/Сеть)	Автономная система (Только ВИЭ + Накопители)	Гибридная система (SMR + ВИЭ + Накопители)	Изменение (Гибрид + Традиционная)
Надежность, %	~85% (зависит от поставок топлива)	~75-80% (зависит от погоды)	>99% (базовый SMR + буфер)	↑ +14%
Приведенная стоимость, \$/кВт·ч	\$0,280 ([10], тариф сети)	\$0,250 – 0,300 (высокая стоимость накопителей)	\$0,185 ([10]) / \$0,158 (оптимизация)	↓ -34%
Выбросы CO ₂ , млн кг/год	100% (базовый уровень)	~20-30% (от производства оборудования)	~5-10% (жизненный цикл)	↓ -58% ([9])
Стабильность сети (топология)	Низкая (риск отключений)	Средняя (требует огромных буферов)	Высокая (режим гибкого изменения мощности)	Качественный скачок
Возможность утилизации избытков	Нет (сжигание топлива впустую)	Ограничение (отключение ВИЭ)	Производство H ₂ или тепло	Секторная интеграция

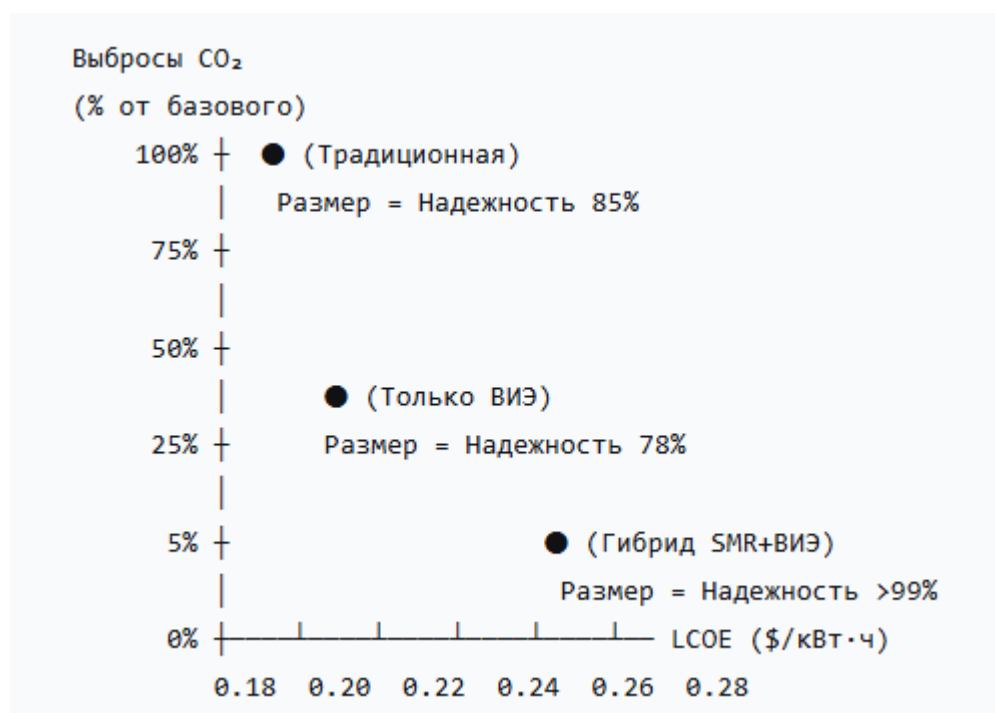


Рис. 3. Сопоставление энергосистем по критериям экономичности, экологичности и надежности

На основании данных, представленных в Таблице 1, на рис. 3 приведена пузырьковая диаграмма, визуализирующая соотношение трех ключевых параметров: приведенной стоимости электроэнергии (LCOE), уровня выбросов CO₂ и коэффициента надежности (КИУМ) для рассматриваемых конфигураций энергосистем.

Выводы

Проведенный анализ современной научной литературы позволяет сделать вывод о том, что интеграция малых модульных реакторов с возобновляемыми источниками энергии представляет собой не просто технически осуществимый, но и экономически эффективный путь развития распределенной энергетики. Данный подход позволяет преодолеть фундаментальное ограничение использования возобновляемых источников энергии (их нестабильность) без ущерба для климатических целей, используя низкоуглеродную ядерную генерацию в качестве балансирующего элемента.

Технические характеристики современных проектов SMR, подтвержденные исследованиями процессов следования за нагрузкой, делают их пригодными для совместной работы с ВИЭ в изолированных и интегрированных энергосистемах.

Создание гибридных энергокомплексов по схеме «SMR + накопители + ВИЭ» позволяет достичь синергетического эффекта, повышая надежность энергоснабжения и общую эффективность генерации.

Технико-экономическое моделирование для различных регионов мира (Юго-Восточная Азия, Африка) подтверждает конкурентоспособность гибридных систем, обеспечивающих снижение средней расчетной стоимости до 34% и значительное сокращение выбросов CO₂.

Дальнейшие исследования в этой области должны быть направлены на совершенствование алгоритмов управления гибридными энергокомплексами, анализ переходных процессов, а также разработку нормативно-правовой базы, регулирующей совместную работу ядерных установок и ВИЭ в составе распределенных энергетических систем.

Список литературы

1. Сугак В.В. Перспективы развития возобновляемой энергетики / Россия молодая: Сборник материалов XVI Всерос. научно-практической конференции с международным участием, 16-19 апр. 2024 г., Кемерово [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева»; – Кемерово, 2024 – с. 021420
2. Сугак В.В. Конвергенция атомной и возобновляемой энергетики. Теоретические и прикладные задачи энергетики. Труды Всероссийской

научно-технической конференции, посвященной 50-летию первого выпуска инженеров-промтеплоэнергетиков. Воронеж, 2025. С. 105-110.

3. Zarei, M. On the inherent load following features of a small modular nuclear reactor. *Nuclear Engineering and Design*, 370, 110896, 2020 – Электронный ресурс – Режим доступа – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029549320303903>

4. Малые модульные реакторы – Электронный ресурс – Режим доступа – URL: <https://tech.onliner.by/2022/05/08/malye-modulnye-reaktory>

5. M.H. Zahedi yeganeh, G.R. Ansarifar . Assessment and predicting the axial power distribution effect on the thermal-mechanical parameters of the NuScale nuclear reactor core loaded with TVS-2 M fuel assemblies as well as axial Offset optimizing for load-following operation / *Nuclear Engineering and Design*, 110896, 2025 – Электронный ресурс – Режим доступа – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029549325001864>

6. BWRX-300: Innovative Deployable SMR. Электронный ресурс – Режим доступа: URL: <https://inis.iaea.org/records/0ncff-8j457>

7. BWRX-300. Электронный ресурс – Режим доступа – URL: <https://www.cnblogs.com/gdone/p/19136144#commentform>

8. Koca, G., & Sozen, A. (2025). Analysis of integrated energy system coupling small modular reactor with renewable energy sources. *International Journal of Global Warming*, 37(1), 81-96.

9. Nergui, O. Decarbonizing Mongolia's Energy Sector: A Techno-Economic Analysis of Hybrid Energy Solutions. *arXiv preprint*, 2025 :2506.15749. Электронный ресурс – Режим доступа – URL: <https://arxiv.org/abs/2506.15749>

10. Integration of Small Modular Reactors with Renewable Energy for Carbon Neutrality: A Case Study of Phuket, Thailand. *Energies*, 17(22), 2024 – Электронный ресурс – Режим доступа – URL: https://scholar-cnki-net-443.webvpn.imac.edu.cn/zn/Detail/index/GARJ2021_5/SJMD776412569BDA1A7277920B367F260112

11. Nyasapoh, M.A. Integrated assessment of nuclear-renewable hybrid energy systems: A pathway to sustainable and resilient industrial electrification in Ghana. *African Journal of Applied Research and Environmental Studies*, 2025 – Электронный ресурс – Режим доступа – URL: <https://www.ajol.info/index.php/ajapres/article/view/305652>

12. Bayomy, A., & Moss crop, L. Small Modular Reactors (SMRs) Deployment and Integrated Energy Systems [Special issue]. *International Journal of Thermofluids*, 2024 – Электронный ресурс – Режим доступа – URL: <https://www.sciencedirect.com/special-issue/10375PWMS4W>