

УДК 338.434:63093:004.9.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГИБРИДНОЙ МИКРОСЕТИ CSP В ПРИГРАНИЧНЫХ РАЙОНАХ АЛТАЯ (КИТАЙ - РОССИЯ)

Сунь Сюаньсюань,

магистрант

Южно-Уральский государственный университет

Россия, Челябинск

1156776697@qq.com

ORCID: 0009-0008-3991-1692

Аннотация

В статье исследуются проблемы распределённой энергетики в экстремальных климатических условиях приграничного региона Алтай (Китай – Россия). Разработана гибридная микросеть на основе солнечной фототермической электростанции (CSP) с 6-часовым аккумулярованием тепла, фотоэлектрических панелей и литий-ионных батарей. Моделирование в MATLAB/Simulink и трёхуровневая система управления обеспечивают устойчивость частоты и напряжения при переходе в островной режим. Оценка нормированной стоимости электроэнергии (LCOE) показала значительный разрыв между китайской (3,88–5,54 руб./кВт·ч) и российской (27,5–41,2 руб./кВт·ч) сторонами, обусловленный климатическими и институциональными рисками. Проведён анализ чувствительности, предложены пути двустороннего сотрудничества: трансфер технологий, кооперация производственных цепочек, совместные демонстрационные зоны.

Ключевые слова: государственный лесной реестр, государственное управление лесами, лесопромышленный комплекс, прослеживаемость древесины, ФГИС ЛК, цифровизация

MODELING AND TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF A CSP HYBRID MICROGRID IN THE BORDER REGIONS OF ALTAI (CHINA - RUSSIA)

Sun Xuanxuan,

Master's student

South Ural State University

Chelyabinsk, Russia

1156776697@qq.com

ORCID: 0009-0008-3991-1692

ABSTRACT

This article examines the challenges of distributed energy in the extreme climatic conditions of the Altai border region (China – Russia). A hybrid microgrid based on a concentrated solar

power (CSP) plant with 6-hour thermal energy storage, photovoltaic panels, and lithium-ion batteries is developed. Modeling in MATLAB/Simulink and a three-level control system ensure frequency and voltage stability during the transition to island mode. The levelized cost of energy (LCOE) assessment revealed a significant gap between the Chinese (3.88–5.54 RUB/kWh) and Russian (27.5–41.2 RUB/kWh) sides, driven by climatic and institutional risks. A sensitivity analysis is conducted, and avenues for bilateral cooperation are proposed: technology transfer, supply chain cooperation, and joint demonstration zones.

Keywords: China–Russia border; Altai region; distributed energy; CSP (concentrated solar power); microgrid; MATLAB/Simulink; LCOE; techno-economic analysis; cross-border energy cooperation.

Введение

В условиях глобального энергоперехода и геополитической эволюции энергетическая безопасность приграничных территорий становится стратегическим приоритетом. Алтайский регион (Синьцзян, Китай и Республика Алтай, Россия) характеризуется экстремальным климатом (перепады температур до 60 °C), удалённостью от сетей и высоким солнечным потенциалом (5400–5700 МДж/м²). Однако местная энергетика сталкивается с нестабильностью выработки, колебаниями потребления и сложными условиями эксплуатации (снег, обледенение, низкие температуры) [5].

В отличие от традиционных фотоэлектрических систем, технология концентрированной солнечной энергии (CSP) с аккумулятированием тепла (TES) обеспечивает возможность долговременного сглаживания нестабильности и поддержку инерции сети [13]. Цель данной работы – на примере двух сопредельных территорий (уезд Цзимунай в Синьцзяне и Республика Алтай в России) провести сравнительное моделирование гибридной микросети CSP, оценить технико-экономическую эффективность и выработать рекомендации по трансграничному сотрудничеству.

При проведении исследования были использованы труды различных ученых, среди которых можно отметить работы Ван Ян, Ло Шуюй, Яо Линсян [1, с.2742], Манусова В.З., Каланакова А.В. [4, с.133], Нефедова Л.В., Рафикова Ю.Ю. [6, с.290], Цы Цзюньчан [7, с.99], Ahmad S., Farzaneh H. [8, p.300], Babayomi O. [9, p.1470], Feng Y., Zhang L., Wang X. [10, p.150], Kozlova M., Collan M. [11, p.400], Pelay U., Luo L., Fan Y. [12, p.100], Wang Y. [14, p.198], Ziyati D., Dollet A., Flamant G. [15, p.200].

Методы и моделирование

Объекты исследования и ресурсная база

Рассматриваются две ключевые площадки:

Китайская сторона: Алтайский край Синьцзяна (уезд Цзимунай, проект «источник – сеть – нагрузка – накопление», установленная мощность ВИЭ >94%) [2,3].

Российская сторона: Республика Алтай (Кош-Агачский район, высота 1760 м, экстремальная температура ниже –48 °C, автономные дизельные сети) [4, с.123].

Архитектура

гибридной

микросети

Разработана интегрированная структура «источник – сеть – нагрузка – накопление» на шине переменного тока (380 В, 50 Гц). Основные компоненты:

- PV-панели (1 МВт, MPPT-контроллер);

- CSP с параболическими желобами и двухрезервуарной системой хранения расплавленной соли (60% NaNO₃ + 40% KNO₃, ёмкость 6 часов);

- литий-ионная батарея (500 кВт·ч, двунаправленный DC/DC преобразователь);

- инвертор напряжения (VSI) с пространственно-векторной модуляцией (SVPWM, 10 кГц).

Выбор мощности обусловлен типовыми нагрузками удалённого населённого пункта (расчётная мощность 150–200 кВт) и необходимостью резервирования на 6–8 часов.

Иерархическая система управления

Реализована трёхуровневая структура:

Верхний уровень координации — оптимизация режимов на основе прогнозов (горизонт от часов до суток). Локальный уровень — кооперативное управление [9] для координации BESS и TES. Уровень оборудования — ПИД и MPC для исполнительных механизмов. Для режимов «сеть» и «остров» используется управление с формированием сети (grid-forming) с коэффициентами провисания:

по частоте: $m_p = 5 \times 10^{-5}$ Гц/Вт

по напряжению: $n_q = 2 \times 10^{-4}$ В/вар

Моделирование в MATLAB/Simulink

Построены следующие модели (рисунки в оригинале диссертации): поле параболического коллектора с учётом прямой нормальной освещённости (DNI) и угла падения; система TES с динамикой температуры в горячем и холодном резервуарах; преобразователи постоянного тока с MPPT и двунаправленным DC/DC; инвертор с контуром фазовой автоподстройки (PLL) и схемой переключения режимов.

Результаты моделирования

Переход «сеть – остров» (частотная характеристика)

Сценарий: при $t = 1,0$ с автоматический выключатель отключает микросеть от основной сети, локальная нагрузка возрастает со 100 до 112–120 кВт. Результаты: частота снижается до 49,2 Гц (нижний предел 49,0 Гц не достигнут). BESS реагирует за 0,2 с (первичное регулирование), а CSP восстанавливает частоту до 49,8 Гц за 2,5 с (вторичное регулирование, скорость набора 20 %/мин). Частота стабилизируется в диапазоне 49,5–50,5 Гц, что соответствует техническим требованиям.

Поддержка напряжения в островном режиме

При набросе индуктивной нагрузки 50 квар ($t = 2,0$ с) на шину 380 В: напряжение кратковременно падает до 356 В (0,94 о.е.). Система Q-V (коэффициент провисания $n_q n_q$) генерирует дополнительную реактивную мощность, напряжение восстанавливается до 374 В (0,98 о.е.) за 1,3 с. Конечная стабилизация выше 378 В, что выше допустимого предела 0,9 о.е.

3.3. Технико-экономическая оценка (LCOE)

Расчёт выполнен по формуле:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + O_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

с учётом региональных особенностей (низкие температуры, удалённость, стоимость оборудования).

Основными рисками для России являются:

1) риски удалённости и проблемы логистики (данные виды рисков включают в себя высокую стоимость доставки материалов, топлива, что ведет к дополнительным затратам);

2) риски, связанные с низкой температурой (ведут к снижению эффективности работы, к увеличению общих эксплуатационных расходов, в том числе связанных с капитальным ремонтом оборудования);

3) риски низкой конкуренции (приводят к падению спроса на продукцию и услуги, сложностям к привлечению финансирования, падению объемов производства).

Таблица 1 — Сравнение LCOE (нормированная стоимость электроэнергии)

Сторона	LCOE (валюта/кВт ч), доллар/юань	LCOE (руб./кВт ч) доллар/рубль	Примечание
Китай (Алтай, Синьцзян)	0,35–0,50 юаня	3,88–5,54	Фактические проектные данные
Россия (Республика Алтай) с риском	0,30–0,45 долл. США	27,5–41,2	Включает премию за инвестиционный риск

Таким образом, можно увидеть, что существует значительный разрыв между показателями LCOE для России. Это можно объяснить следующими основными причинами:

1) использование различных технологий производства энергии (например, использование новых угольных или газовых станций, атомной энергетики, применение некоторых видов возобновляемой энергетики с высокой капитальной стоимостью);

2) наличие специфических причин и условий производства (использование оборудования с высокой амортизационной стоимостью, специфические тендеры на возобновляемую энергетику с высоким уровнем конкуренции).

Анализ чувствительности показывает, что наиболее значимыми факторами являются: снижение стоимости оборудования на 10% → уменьшение LCOE на 3–7%; уменьшение годовой выработки на 10% → рост LCOE на 8–11%; увеличение ставки дисконтирования с 6% до 10% (Китай) → рост LCOE на 15–20%; для России при росте с 8% до 12% → рост на 18–25%; цена углерода (80–100 юаней/т CO₂) снижает эквивалентный LCOE на 0,05–0,08 юаня/кВт ч.

Таблица 2 – Анализ чувствительности LCOE

Фактор	Изменение	Изменение LCOE (Китай)	Изменение LCOE (Россия)
Стоимость оборудования	-10%	-3%	-7%
Годовая выработка	-10%	+8%	+11%
Ставка дисконтирования	+4 п.п.	20%	25%
Цена углерода	100 юаней/т	-0,05 юаня	-0,08 юаня

Обсуждение и рекомендации

Полученные результаты подтверждают техническую эффективность предложенной гибридной микросети: сочетание «долговременное тепловое накопление (CSP) + быстрое электрическое накопление (BESS)» обеспечивает устойчивость частоты и напряжения при внезапных возмущениях.

Экономический разрыв между Китаем и Россией объясняется в первую очередь масштабами производства, локализацией цепочек поставок и климатическими надбавками. Для преодоления этих различий предлагаются следующие пути сотрудничества:

Китайской стороне – переход от крупномасштабного строительства к интеллектуальной эксплуатации (внедрение систем прогнозной аналитики, оптимизация графиков зарядки/разрядки TES).

Российской стороне – переход от пилотных проектов к маркетингу: долгосрочные соглашения о покупке электроэнергии, углеродное кредитование, адаптация китайского оборудования к экстремальным условиям.

Совместные меры:

- трансфер технологий (китайский опыт строительства CSP в холодном климате);
- кооперация производственных цепочек (поставка зеркал, теплоносителей, систем слежения);
- создание трансграничной демонстрационной зоны «чистая энергия Большого Алтая»;
- гармонизация технических регламентов и взаимное признание углеродных единиц в рамках ШОС и ЕАЭС.

Заключение

В работе разработана и верифицирована модель гибридной микросети CSP в среде MATLAB/Simulink применительно к суровым условиям китайско-российского приграничного региона Алтай. Показано, что предложенная трёхуровневая система управления и комбинированное накопление энергии (TES + BESS) обеспечивают соответствие переходных процессов требованиям по частоте (49,5–50,5 Гц) и напряжению ($\geq 0,9$ о.е.). Выполнена количественная оценка LCOE: для Китая – 3,88–5,54 руб./кВт ч, для России – 27,5–41,2 руб./кВт ч (с рисками) или 4,33 руб./кВт ч (по тендерным ценам). Проведён анализ чувствительности и предложены прагматичные направления двустороннего энергетического сотрудничества. Дальнейшие исследования должны быть направлены на уточнение модели LCOE на основе реальных финансовых данных, моделирование взаимодействия с крупной сетью и анализ трансграничных энерготранзакций.

Список литературы:

1. Ван Ян, Ло Шуюй, Яо Линсян и др. Обзор планирования солнечных тепловых электростанций для крупных баз возобновляемой энергетики: сценарии, модели и направления развития // Технологии электросетей. – 2025. – Т. 49, № 7. – С. 2712–2724.
2. В погоне за ветром и солнцем, взгляд на Синьцзян: источник – сеть – нагрузка – накопление вместе обеспечивают «зелёную» энергию в Джимунае [Электронный ресурс] // CCTV.com. – 2024. – 2 сент. – URL: <https://news.cctv.com/2024/09/02/ARTIJsx1QfFDinwunmeIp8CJ240902.shtml> (дата обращения: 26.03.2026).
3. Ван Шан Юйци. Алтай: зелёное низкоуглеродное развитие способствует высококачественному экономическому росту // China Today. – 2025. – 7 марта. – URL: http://www.chinatoday.com.cn/zw2018/rdzt/2025lh/jzzj/202503/t20250307_800394456.html.
4. Манусов В.З., Каланакова А.В. Выбор оптимальных режимов энергопотребления в локальной электросети Республики Алтай на основе возобновляемых и альтернативных источников энергии // iPolytech Journal. – 2023. – Т. 27, № 1. – С. 123–133. DOI: 10.21285/1814-3520-2023-1-123-133.
5. Международное энергетическое агентство (IEA). Renewable Energy 2024 : annual report. – Paris : IEA, 2024. – 142 p. – URL: <https://www.iea.org/reports/renewables-2024>.
6. Нефедова Л.В., Рафикова Ю.Ю. Оценка роли развития солнечной энергетики как инструмента энергетического перехода в России // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2023. – Т. 31, № 2. – С. 278–290. DOI: 10.22363/2313-2310-2023-31-2-278-290.

7. Цы Цзюньчан. Инженерный прогресс в применении технологии аккумуляирования тепла в расплавленных солях в области производства энергии из концентрированного солнечного излучения // Southern Energy Construction. – 2025. – Т. 12, № 5. – С. 85–99. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-407.
8. hmad S., Farzaneh H. Techno-economic analysis and dynamic power modeling of solar-wind-battery hybrid system for rural electrification in Pakistan // Cleaner Energy Systems. – 2024. – Vol. 8. – Art. 100127. DOI: 10.1016/j.cles.2024.100127.
9. Babayomi O. Distributed predictive cooperative control for smart power converters in microgrids // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. – 2026. – Vol. 14, № 2. – P. 1456–1470.
10. Feng Y., Zhang L., Wang X. et al. Integration of remote sensing, GIS and multi-criteria decision making for photovoltaic potential assessment in mountainous regions // Renewable Energy. – 2025. – Vol. 241. – Art. 122340. DOI: 10.1016/j.renene.2025.122340.
11. Kozlova M., Collan M. Investment attractiveness of renewable energy: A multi-criteria regional analysis from an investor's perspective // Renewable Energy. – 2020. – Vol. 150. – P. 382–400. DOI: 10.1016/j.renene.2019.12.116.
12. Pelay U., Luo L., Fan Y. et al. Thermal energy storage systems for concentrated solar power plants // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 79. – P. 82–100. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.139.
13. Ruan Z.W., Wang Y.H., Lu X. et al. A systematic review of China's wind and solar energy development towards carbon neutrality // Technology Review for Carbon Neutrality. – 2025. DOI: 10.26599/TRCN.2025.9550010.
14. Wang Y. Resilience-oriented planning and operation of networked microgrids based on decentralization and flexibility: PhD thesis. – London: Imperial College London, 2022. – 198 p.
15. Ziyati D., Dollet A., Flamant G. et al. Multiphysics model of compact PV–CSP hybrid power plants // Applied Energy. – 2021. – Vol. 296. – Art. 117045. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116644.

References:

1. Wang Yang, Luo Shuyu, Yao Lingxiang, et al. A Review of Solar Thermal Power Plant Planning for Large-Scale Renewable Energy Bases: Scenarios, Models, and Development Directions // Electric Grid Technologies. – 2025. – Vol. 49, No. 7. – Pp. 2712–2724.
2. Chasing Wind and Sun, a Look at Xinjiang: Source-Grid-Load-Storage Together Provides Green Energy in Jimunai [Electronic Resource] // CCTV.com. – 2024. – September 2. – URL: <https://news.cctv.com/2024/09/02/ARTIJsx1QfFDinwunmIp8CJ240902.shtml> (accessed: March 26, 2026).
3. Wang Shan Yuqi. Altai: Green Low-Carbon Development Promotes High-Quality Economic Growth // China Today. – 2025. – March 7. – URL: http://www.chinatoday.com.cn/zw2018/rdzt/2025lh/jzzj/202503/t20250307_800394456.html.
4. Manusov V.Z., Kalanakova A.V. Selection of Optimal Energy Consumption Modes in the Local Power Grid of the Altai Republic Based on Renewable and Alternative Energy Sources

- // iPolytech Journal. – 2023. – Vol. 27, No. 1. – Pp. 123–133. DOI: 10.21285/1814-3520-2023-1-123-133.
5. International Energy Agency (IEA). Renewable Energy 2024: annual report. – Paris: IEA, 2024. – 142 p. – URL: <https://www.iea.org/reports/renewables-2024>.
 6. Nefedova, L.V., Rafikova, Yu.Yu. Assessing the Role of Solar Energy Development as a Tool for Energy Transition in Russia // RUDN University Bulletin. Series: Ecology and Life Safety. – 2023. – Vol. 31, No. 2. – P. 278–290. DOI: 10.22363/2313-2310-2023-31-2-278-290.
 7. Ci Junchang. Engineering Progress in the Application of Molten Salt Heat Storage Technology for Concentrated Solar Radiation Energy Production // Southern Energy Construction. – 2025. – T. 12, No. 5. – P. 85–99. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-407.
 8. hmad S., Farzaneh H. Techno-economic analysis and dynamic power modeling of solar wind battery hybrid system for rural electrification in Pakistan // Cleaner Energy Systems. – 2024. – Vol. 8. – Art. 100127. DOI: 10.1016/j.cles.2024.100127.
 9. Babayomi O. Distributed predictive cooperative control for smart power converters in microgrids // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. – 2026. – Vol. 14, No. 2. – P. 1456–1470.
 10. Feng Y., Zhang L., Wang X. et al. Integration of remote sensing, GIS and multi-criteria decision making for photovoltaic potential assessment in mountainous regions // Renewable Energy. – 2025. – Vol. 241. – Art. 122340. DOI: 10.1016/j.renene.2025.122340.
 11. Kozlova M., Collan M. Investment attractiveness of renewable energy: A multi-criteria regional analysis from an investor's perspective // Renewable Energy. – 2020. – Vol. 150. – P. 382–400. DOI: 10.1016/j.renene.2019.12.116.
 12. Pelay U., Luo L., Fan Y. et al. Thermal energy storage systems for concentrated solar power plants // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 79. – P. 82–100. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.139.
 13. Ruan Z.W., Wang Y.H., Lu X. et al. A systematic review of China's wind and solar energy development towards carbon neutrality // Technology Review for Carbon Neutrality. – 2025. DOI: 10.26599/TRCN.2025.9550010.
 14. Wang Y. Resilience-oriented planning and operation of networked microgrids based on decentralization and flexibility: PhD thesis. – London: Imperial College London, 2022. – 198 p.
 15. Ziyati D., Dollet A., Flamant G. et al. Multiphysics model of compact PV–CSP hybrid power plants // Applied Energy. – 2021. – Vol. 296. – Art. 117045. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116644.