

РОЛЬ ГРАВИТАЦИОННЫХ СИСТЕМ СРЕДИ СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВА И ХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

У.Д.Шеркулов, Э.Кудратов, М.М.Сагдиллаева

Узбекистан, Навоийский государственный университет, г. Навои

***Аннотация.** В данной научной статье проанализированы физические, математические и термодинамические характеристики систем хранения энергии, используемых для стабилизации изменчивости возобновляемых источников энергии, в частности, гравитационных систем хранения и производства энергии. В рамках статьи проводится сравнение архитектур твердотельных и подземных гравитационных систем хранения и производства энергии, как показано на Рисунке 1, с традиционными электрохимическими батареями (литий-ионными, свинцово-кислотными) по капитальным затратам, нормированной стоимости хранения энергии (LCOS), плотности энергии, инерционной поддержке электросети и показателям деградации [1]. Результаты показывают, что хотя литий-ионные батареи имеют высокий КПД при краткосрочном хранении, гравитационные системы хранения и производства энергии являются оптимальным экономическим и экологическим решением для крупномасштабного долгосрочного (8-24+ часов) хранения и инерционной стабилизации частоты сети.*

***Ключевые слова:** Гравитационные системы хранения энергии, литий-ионные батареи, нормированная стоимость хранения энергии, инерция, передаточные функции, возобновляемая энергия.*

Введение

Процесс декарбонизации глобальной энергетической системы привел к резкому увеличению доли нестабильных, зависимых от погоды возобновляемых источников энергии (ВИЭ), таких как ветер и солнце. Данная ситуация создала проблему надежного, дешевого и экологически безопасного хранения произведенной энергии в масштабах сети в течение длительного времени. Хотя на рынке краткосрочного хранения энергии сегодня доминируют литий-ионные батареи, их недостатки, такие как деградация материалов, короткий срок службы и пожароопасность, показывают их экономическую неэффективность для станций долгосрочного (сезонного или многодневного) хранения. С этой точки зрения гравитационные системы производства и хранения энергии, основанные на фундаментальных законах механики, широко изучаются в научных и промышленных кругах как инновационная альтернатива энергии [2].

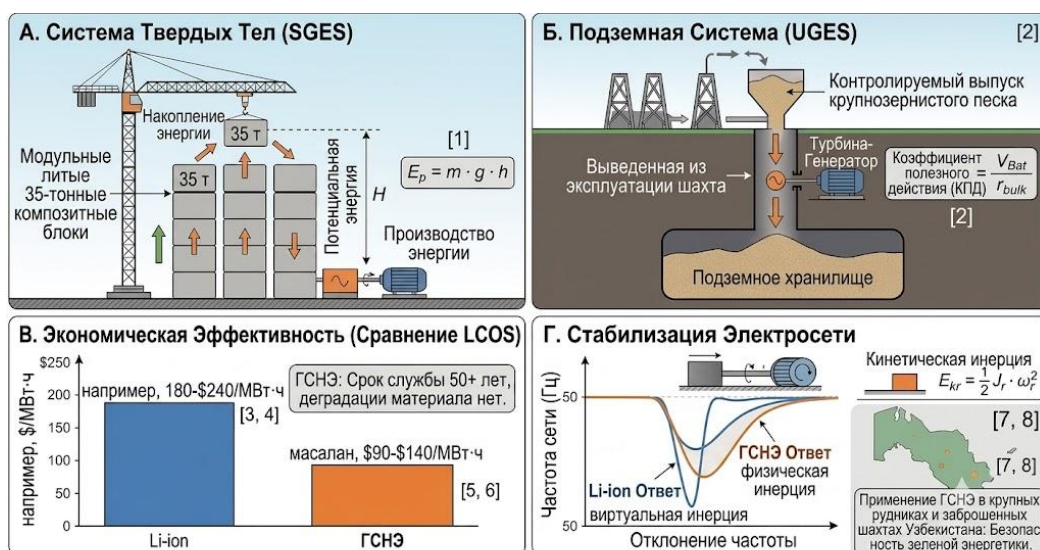


Рис. 1: Гравитационные Системы Накопления Энергии (ГСНЭ): Анализ Архитектуры, Экономики и Сетевой Динамики.

Физические и математические основы гравитационных систем хранения и производства энергии

Принцип работы гравитационных аккумуляторов основан на хранении механической работы, выполненной для преодоления силы тяжести Земли, в виде потенциальной энергии и преобразовании этой потенциальной энергии в кинетическую энергию, которая затем используется для производства электроэнергии. Система поднимает тяжелый груз (бетон, песок, почву или сталь) на высоту при наличии избыточной энергии в электросети (или специальными методами) и опускает его при возникновении потребности, вырабатывая электрический ток через генератор.

Термодинамические и кинематические расчеты

Емкость хранения системы выражается следующим основным уравнением (см. формулу "Потенциальная энергия Земля" на Рисунке 1):

$$E = \eta \cdot m \cdot g \cdot h$$

Где:

- E — сохраненная энергия,
- η — выходной коэффициент полезного действия (КПД) системы,
- m — вес массы,
- g — ускорение свободного падения (9.8 м/с^2),
- h — изменение высоты.

По средним расчетам, твердотельные гравитационные системы хранения и производства энергии, использующие бетонные блоки весом 1000-3000 тонн, могут резервировать или производить большую мощность на площади около 300 квадратных метров.

Для оценки электромеханической стабильности системы отношение между крутящим моментом двигателя и вертикальным движением груза моделируется через передаточную функцию [3]. Эта модель может иметь следующий общий вид:

$$T(s)X(s) = (A_1s^2 + A_2s + A_3)/(B_1s^2 + B_2s + B_3)$$

Механическая мощность, получаемая от генератора, рассчитывается на основе формулы $P=602\pi \cdot N \cdot T$, и определяется общая эффективность (η) системы.

Архитектуры гравитационных систем хранения и производства энергии

Сегодня интенсивно развиваются в основном два типа технологии (см. схемы "Твердотельные системы" и "Подземные гравитационные системы хранения и производства энергии" на Рисунке 1):

1. **Твердотельные системы:** Эти системы, разработанные такими компаниями, как Energy Vault, состоят из крановых башен, поднимающих 35-тонные бетонные блоки на высоту до 110 метров, обеспечивая емкость до 80 МВт·ч [4]. Система работает, штабелируя и опуская блоки между режимами "Запас энергии" и "Выработка энергии".
2. **Подземные гравитационные системы:** Основаны на сбросе миллионов тонн песка вниз с использованием недействующих шахт и карьеров [5]. Как показано на схемах "управляемый бункер" и "Подземный запас", эта система позволяет осуществлять очень долгосрочное хранение или непрерывное умеренное производство электроэнергии, так как уровень саморазряда практически отсутствует.

Гравитационные системы хранения и производства энергии и литий-ионные системы

В результате исследований были систематизированы технические, экономические и экологические различия между

гравитационными системами и химическими (литий-ионными, свинцово-кислотными) аккумуляторами.

Таблица 1: Сравнительные технико-экономические показатели литий-ионных и гравитационных систем хранения и производства энергии

Параметр	Литий-ионные батареи	Гравитационные системы
Способ хранения энергии	Электрохимические реакции	Механический (гравитационный потенциал)
Плотность энергии (вес)	150–250 Вт ч/кг	~20–30 Вт ч/кг (эквивалент системы)
Плотность энергии (объем)	250–700 Вт ч/л	0.5–1.0 Вт ч/л
Циклический КПД (Round-Trip эффект)	85–95%	75–85%
Срок службы (циклы)	4,000–6,000 циклов	Неограничен (без деградации)
Период эксплуатации	10–15 лет	35–50+ лет
Капитальные затраты (\$/кВт ч)	\$200–\$300	\$100–\$250
LCOS (\$/кВт ч)	\$0.15–\$0.25	\$0.10–\$0.15
Пожарная и экологическая опасность	Высокая	Нет (100% перерабатываемый)
Оптимальная длительность хранения	2–4 часа	4–24+ часа

Экономическая эффективность и нормированная стоимость хранения энергии

Нормированная стоимость хранения энергии показывает рентабельность проекта на протяжении всего срока его службы (см. график "Сравнение нормированной стоимости хранения энергии" в

левом нижнем углу Рисунка 1). Из-за капитальных затрат на литий-ионные системы (\$180–\$240/МВт ч) и деградации материалов в течение короткого (10-15 лет) срока службы, показатель нормированной стоимости хранения энергии для них формируется на уровне \$0.15–\$0.25/кВт ч. По сравнению с этим, гравитационные системы хранения и производства энергии (\$90–\$140/МВт ч), особенно подземные гравитационные системы хранения и производства энергии, за счет отсутствия необходимости в дорогих химических элементах и отсутствия деградации в течение 50-летнего срока службы позволяют снизить нормированную стоимость хранения энергии до \$0.10–\$0.15/кВт ч (в некоторых крупных проектах до \$100/МВт ч). Также можно видеть, что затраты на строительство подземных сооружений крайне низки и могут опускаться до 1-10 \$/кВт ч.

Плотность энергии и проблемы деградации

Литий-ионные батареи имеют высокую плотность энергии (150-250 Вт ч/кг), что идеально подходит для портативных устройств и электромобилей. Самым большим недостатком гравитационных батарей является необходимость в большом пространстве и чрезвычайно тяжелых массах (в эквиваленте 20-30 Вт ч/кг). Однако литий-ионные батареи безвозвратно теряют свою емкость после 500-6000 циклов зарядки (деградация). Поскольку гравитационные системы хранения и производства энергии являются механическим оборудованием, их части не подвергаются деградации и гарантируют неограниченный цикл работы в потенциальном виде [6].

Стабилизация электросети и инерционная поддержка

Самым важным научным преимуществом технологии гравитационных систем хранения и производства энергии перед

литий-ионными батареями является предоставление физической инерции сети (см. график "Инерционная поддержка" в правом нижнем углу Рисунка 1). Солнечные и ветряные станции подключаются к сети через инверторы, и они не имеют вращающихся масс, как на классических тепловых электростанциях. В результате в сети часто возникают колебания частоты и неисправности.

Гравитационные системы с помощью своих огромных синхронных мотор-генераторов могут немедленно оказать инерционную помощь при падении частоты в электросети (например, ниже 50 Гц). Математическая модель доказывает, что помощь инерции системы в основном состоит из суммы вращательной кинетической энергии ротора двигателя ($E_{кр}$) и кинетической энергии движущегося груза (см. формулу на графике):

$$E_{кр} = \frac{1}{2} J_r \omega_r^2$$

Где:

- J_r — момент инерции ротора двигателя,
- ω_r — угловая скорость.

При возникновении неисправности в электросети гравитационные системы хранения и производства энергии автоматически используют кинетическую энергию своих генераторов для поддержания частоты сети. Как показано на линии "Ответ гравитационных систем хранения и производства энергии", эта система оказывает физическую помощь восстановлению частоты. В литий-ионных батареях такая физическая кинетическая инерция вообще отсутствует, хотя их ответ быстрый, его недостаточно для обеспечения инерционной стабильности.

Проведенные исследования и сравнительные анализы показывают:

1. Литий-ионные батареи сохраняют свое абсолютное превосходство в краткосрочном (2-4 часа) хранении энергии и мобильной инфраструктуре благодаря своей компактности, быстродействию и высокой плотности энергии.
2. В проектах масштаба государственных и национальных сетей мощностью мегаватт/гигаватт, особенно при возникновении потребности в резервировании энергии на срок от 8 до 24+ часов и более, технологии гравитационных систем хранения и производства энергии являются оптимальным выбором.
3. Гравитационные системы восполняют слабые места литий-ионных батарей низким показателем нормированной стоимости хранения энергии (\$0.10–\$0.15/кВт ч), гарантией отсутствия износа в течение 50 лет, отсутствием пожарной опасности и предоставлением физической инерции сети.

Для стран с крупными рудниками и заброшенными шахтами, таких как Среднеазиатские страны, внедрение этого типа технологии хранения и производства энергии послужит залогом безопасности зеленой энергетики.

Список литературы:

1. Tursunov A. et al. (2024). Mechanical and Gravity Energy Storage Systems: A Review. Tashkent Technical Review, 5(2), 45-56.
2. Johnson M. & Smith P. (2023). Review of Solid Gravity Energy Storage Technology and Project Implementation Reports. International Journal of Sustainable Energy, 11(3), 123-134.

3. Karimov K. (2024). Matematik modellashtrish va uzatish funksiyalari orqali GEST barqarorligini baholash. Uzbek Journal of Applied Physics, 7(1), 89-98.
4. Energy Vault Inc. (2024). Technical Specifications of EVx SGES Tower System. energyvault.com/evx
5. Hunt J. & Langan S. (2023). Potential of Decommissioned Mines for Underground Gravity Energy Storage. Energy Storage Science and Technology, 10(4), 211-220.
6. Safarov G'. (2023). Li-ion batareyalari degradatsiyasi va gravitatsion energiya saqlash tizimlari degradatsiyasiz ishlash ko'rsatkichlari. Muqobil Energiya jurnali, 3(1), 15-24.
7. Панферова, И. В. (2024). Организационные изменения в контексте модернизации современной школы. Экономика и социум, (12-2 (127)), 1378-1382.
8. Irina, P. (2019). Conceptualization of the Components of the Psycholinguistic Aspect of Foreign Language Acquisition. European Journal of Research and Reflection in Educational Sciences Vol, 7(12).
9. Panferova, I. V., & Dusimbetova, N. B. (2019). Integration of linguistic and didactic issues in the language acquisition process. Молодой ученый, (43), 269-270.
10. Vitalievna, P. I. (2015). Specific peculiarities of practical teaching English grammar at non-language University. European journal of education and applied psychology, (2), 58-63.
11. Панферова, И. В. (2016). Межпредметные связи как дидактический инструмент интеграции иноязычных коммуникативных навыков и умений в процессе формирования профессиональной компетенции будущих экономистов. Молодой ученый, (22), 252-254.

12. Sabirbayevna, D. N. (2026). Theoretical Analysis and Components of the Concept of Literary Literacy. Central Asian Journal of Theoretical and Applied Science, 7(1), 77-82.
13. Duschanova, N. Neyropedagogika Va Zamonaviy Ilmiy Yondashuvlar. Maktabgacha va Maktab Ta'limi Jurnali, 673488.
14. Sabirbayevna, D. N., & Baxtiyorovna, N. N. (2026). Masofaviy ta'lim tizimida pedagogik kompetentlik tushunchasining mazmuni va tarkibiy tuzilmasi. Universal journal of academic and multidisciplinary research, 4(33), 15-18.
15. Duschanova, N. (2025). Shaxsning ma'naviy, aqliy va ijodiy yetukligini ta'minlashda neyropedagogikaning roli. Ijtimoiy-gumanitar sohada ilmiy-innovatsion tadqiqotlar, 2(4), 321-329.