

УДК 621.3

РАСЧЕТ И ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВНЕДРЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО АККУМУЛЯТОРА

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

Аннотация. В статье рассматриваются принципы работы, методики расчета и перспективы внедрения гравитационных аккумуляторов (ГАЭ) в современные энергосистемы. В работе представлены физические основы работы ГАЭ, методики расчета их эффективности, энергоемкости и мощности, а также проведен анализ практической применимости технологии. Статья также затрагивает вопросы масштабируемости, экологической безопасности и перспектив дальнейшего развития технологии. Результаты исследования демонстрируют, что гравитационные аккумуляторы могут стать важным элементом в устойчивом развитии энергетики, особенно в условиях растущей доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергосистемах.

Ключевые слова: гравитационный аккумулятор, потенциальная энергия, хранение энергии, возобновляемые источники энергии, КПД, энергоемкость, экологическая безопасность.

Введение. Современные энергетические системы сталкиваются с двумя основными вызовами: необходимостью интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и обеспечением стабильности энергоснабжения. Солнечные и ветровые электростанции [1] зависят от погодных условий, что делает хранение энергии критически важным элементом энергосистемы (рис.1). Гравитационные аккумуляторы, использующие принцип потенциальной энергии, предлагают простое, надежное и экологически чистое решение для хранения энергии [2]. В данной статье представлен подробный анализ принципов работы, методик расчета и перспектив применения ГАЭ.

Целью данной работы является проведение подробного анализа принципов работы гравитационных аккумуляторов, разработка методики расчета их эффективности и энергоемкости, а также оценка перспективы их внедрения в современные энергосистемы. В статье рассмотрены физические основы работы ГАЭ, проведены расчеты типовой системы с использованием программы SmathStudio, а также предложены направления для дальнейшего развития и оптимизации технологии.



Рис.1. Гибрид ветроэнергетической установки
и гравитационного аккумулятора

Физические основы гравитационного аккумулятора. Гравитационный аккумулятор (рис.2) работает на основе преобразования энергии между потенциальной и кинетической формами [3]. Основные этапы работы системы это – зарядка, так как электроэнергия используется для подъема груза на высоту, увеличивая его потенциальную энергию; хранение – груз удерживается на высоте до момента необходимости использования энергии; разрядка (груз опускается, а его потенциальная энергия преобразуется в кинетическую, которая затем преобразуется в электрическую с помощью генератора).

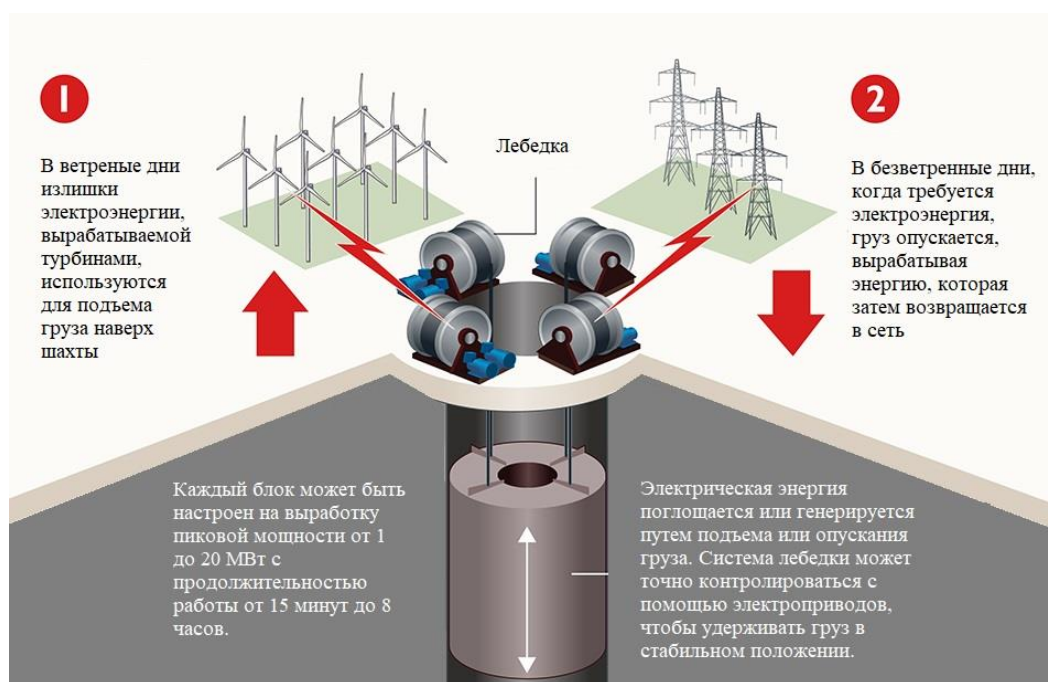


Рис. 2. Инновационная твердотельная аккумулирующая станция

Потенциальная энергия груза рассчитывается по формуле (1):

$$E_p = m \cdot g \cdot h, \quad (1)$$

где

E_p – потенциальная энергия (Дж),

m – масса груза (кг),

g – ускорение свободного падения (м/с^2),

h – высота подъема груза (м).

Рассмотрим методику расчета эффективности системы. Эффективность гравитационного аккумулятора зависит от нескольких факторов, первый из них это коэффициент полезного действия (КПД) преобразования энергии:

– КПД подъемного механизма ($\eta_{\text{подъем}}$),

– КПД генератора ($\eta_{\text{ген}}$),

Общий КПД системы рассчитывается по формуле (2):

$$\eta_{\text{общ}} = \eta_{\text{подъем}} \cdot \eta_{\text{ген}}. \quad (2)$$

Типичные значения $\eta_{\text{общ}}$ составляют 70-85 %.

Вторым фактором являются потери на трение. Потери энергии из-за трения в механизмах можно оценить с учетом коэффициента трения μ (3):

$$E_{\text{потери}} = \mu \cdot m \cdot g \cdot h. \quad (3)$$

Третий фактор это мощность системы. Мощность, которую может выдать система, зависит от скорости опускания груза (v) (4):

$$P = m \cdot g \cdot v \cdot \eta_{\text{общ}}. \quad (4)$$

И последний фактор – энергоемкость системы. Энергоемкость (C) определяется как общее количество энергии, которое может быть запасено:

$$C = E_p \cdot \eta_{\text{общ}}. \quad (5)$$

Рассмотрим пример расчета типовой системы, выполненный в программе SmathStudio (рис.3). Для расчета необходимо задать параметры аккумулятора, такие как масса груза, высота подъема, КПД системы и скорость опускания. По формуле (1) рассчитаем потенциальную энергию, формула (4) используется для расчета мощности системы, энергоемкость рассчитаем по формуле (5), а для расчета времени работы при полной разрядке используем формулу (6):

$$t = \frac{E_p}{P}. \quad (6)$$

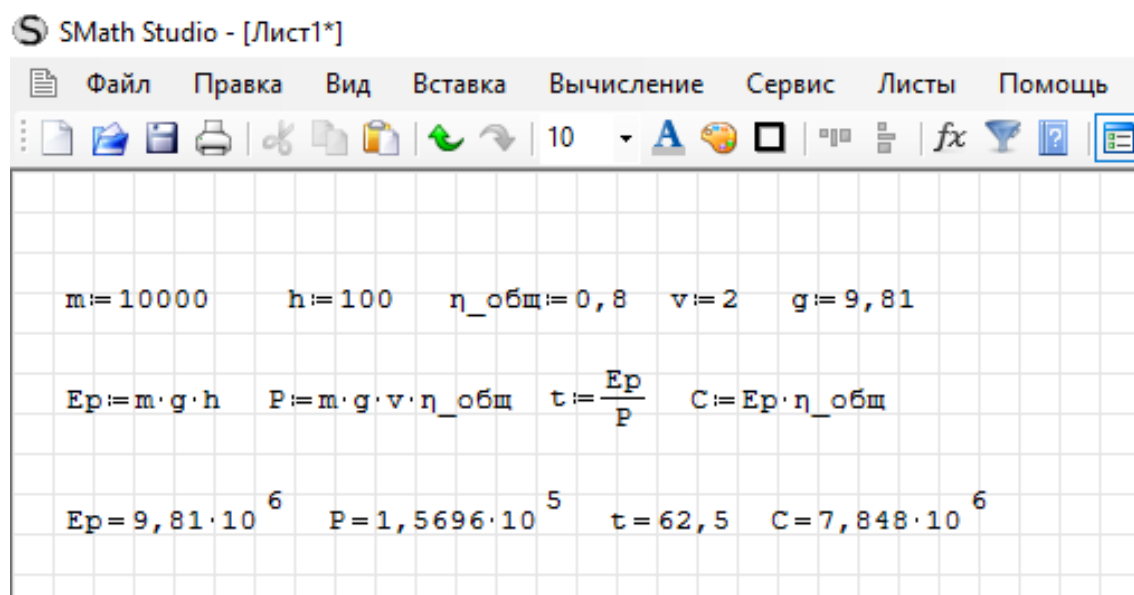


Рис. 3. Расчет системы аккумулирования энергии

– В нашем примере потенциальная энергия груза составила 9,81 МДж, а с учетом КПД системы (80%) полезная энергоемкость – 7,85 МДж. Следовательно, энергоемкость гравитационного аккумулятора напрямую зависит от массы груза и высоты подъема. Для увеличения энергоемкости необходимо либо увеличивать массу груза, либо высоту подъема. Однако оба параметра имеют физические и экономические ограничения.

– Мощность системы составила 156,96 кВт при скорости опускания груза 2 м/с. Соответственно, мощность системы зависит от скорости опускания груза. Чем выше скорость, тем больше мощность, но это также увеличивает нагрузку на механизмы и может привести к росту потерь на трение. Необходимо находить баланс между мощностью и долговечностью системы.

– Время работы системы при полной разрядке составило 62,5 секунд. Это означает, что гравитационные аккумуляторы лучше подходят для кратковременного хранения и выдачи энергии. Для увеличения времени работы необходимо либо увеличивать энергоемкость (массу или высоту), либо снижать мощность системы.

– Общий КПД системы составил 80%, что является типичным значением для подобных систем. Делаем вывод, что потери энергии в основном связаны с трением и неидеальностью механизмов. Для повышения эффективности необходимо оптимизировать конструкцию подъемного механизма и генератора.

– В нашем примере система способна запасти 7,85 МДж энергии, что эквивалентно 2,18 кВт·ч (1 кВт·ч = 3,6 МДж). Такая система может быть полезна для локального применения, например, для обеспечения энергией небольшого дома или объекта на короткий период времени. Однако для крупномасштабного применения (например, для энергосистемы города) потребуются значительно большие массы и высоты.

Практические аспекты внедрения гравитационных аккумуляторов

– Локальное применение. Гравитационные аккумуляторы могут быть эффективно использованы для обеспечения энергией небольших объектов, таких

как частные дома, фермы или удаленные поселения. В статье приведен пример системы с энергоемкостью 7,85 МДж (2,18 кВт·ч), что достаточно для кратковременного обеспечения энергией небольшого дома. Это делает технологию привлекательной для локального использования, особенно в регионах с ограниченным доступом к централизованной энергосистеме.

– Интеграция с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ). Гравитационные аккумуляторы могут быть использованы для сглаживания пиков выработки энергии солнечными и ветровыми электростанциями. Такие системы могут служить буфером для хранения избыточной энергии, вырабатываемой ВИЭ, и ее последующего использования в периоды низкой генерации. Это особенно важно для стабилизации энергосистем, где доля ВИЭ постоянно растет.

– Использование в специфических условиях. Гравитационные аккумуляторы могут быть особенно эффективны в горной местности или в заброшенных шахтах [4], где уже существуют естественные перепады высот. Это снижает затраты на строительство и делает технологию более экономически выгодной. В таких условиях гравитационные аккумуляторы могут стать альтернативой традиционным гидроаккумулирующим электростанциям (ГАЭС).

– Экологическая безопасность. В отличие от химических аккумуляторов, гравитационные системы не требуют использования редких или токсичных материалов, что делает их экологически безопасными. Это особенно важно в контексте устойчивого развития и снижения воздействия на окружающую среду.

– Масштабируемость и экономические ограничения. Масштабируемость гравитационных аккумуляторов ограничена физическими параметрами, такими как масса груза и высота подъема. Увеличение этих параметров требует значительных затрат на строительство и материалы. Однако для небольших систем, таких как локальные энергохранилища, технология уже может быть экономически оправданной.

– Оптимизация конструкции. Для повышения эффективности гравитационных аккумуляторов необходимо оптимизировать конструкцию подъемного механизма и генератора. Использование современных материалов, снижение трения и повышение КПД могут сделать технологию более конкурентоспособной.

– Краткосрочное хранение энергии. Гравитационные аккумуляторы лучше всего подходят для кратковременного хранения и выдачи энергии. Исходя из вышеизложенных материалов время работы системы при полной разрядке составило 62,5 секунд. Это делает их идеальными для сглаживания пиков потребления или аварийного резервирования.

Для крупномасштабного применения, например, в энергосистемах городов, потребуются значительные инвестиции в строительство и материалы. Однако в долгосрочной перспективе гравитационные аккумуляторы могут стать частью гибридных систем хранения энергии, сочетающих различные технологии для повышения надежности и эффективности.

Выводы. Гравитационные аккумуляторы подходят для кратковременного хранения энергии. Они могут быть эффективны в качестве буферных систем для сглаживания пиков потребления или интеграции с возобновляемыми источниками энергии (например, солнечными или ветровыми электростанциями).

Масштабируемость системы ограничена физическими параметрами. Увеличение массы груза или высоты подъема требует значительных затрат на строительство и материалы. Это делает гравитационные аккумуляторы более привлекательными для локального применения или использования в специфических условиях (например, в горной местности или заброшенных шахтах).

Эффективность системы можно повысить за счет оптимизации конструкции. Использование современных материалов, снижение трения и повышение КПД генератора могут сделать технологию более конкурентоспособной.

Гравитационные аккумуляторы экологически безопасны. В отличие от химических аккумуляторов, они не требуют редких или токсичных материалов, что делает их привлекательными для устойчивого развития.

Технология требует дальнейших исследований и разработок. Для широкого внедрения необходимо решить вопросы снижения затрат, увеличения энергоемкости и интеграции в существующие энергосистемы.

Таким образом, расчет типовой системы позволяет не только оценить текущие возможности технологии, но и определить направления для ее дальнейшего развития и оптимизации.

Список литературы

1. Сугак В.В. Перспективы развития возобновляемой энергетики / В.В. Сугак, Т.Е. Черных / 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»; редкол.: К. С. Костиков (отв. ред.) [и др.]. – Кемерово, 2024 – с. 021420

2. Гравитационный аккумулятор в Китае – Электронный ресурс – Режим доступа: https://dzen.ru/a/ZNR26L6wgVQU_aji

3. Терехов Я.С. Перспективы развития гравитационной энергетики / Я.С. Терехов, В.В. Сугак, М.А. Зубков, Т.Е. Черных / Прикладные задачи энергетики, электротехники и автоматики: Труды Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2024, с. 152-156,

4. Гравитационный аккумулятор на месте заброшенной шахты Европы – Электронный ресурс – Режим доступа: https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.537fc25a-67cdd78d-00a75f36-74722d776562/https/www.independent.co.uk/tech/gravity-battery-mine-renewable-energy-b2492087.html