

## ИНТЕГРАЦИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО АККУМУЛЯТОРА В ВЕТРЯНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Сугак В.В., студент 2 курса факультета энергетики и систем  
управления

Научный руководитель – Черных Т.Е., старший преподаватель  
ФГБОУ ВО Воронежский государственный технический  
университет

*Ключевые слова:* гравитационный аккумулятор, ветряные  
электростанции, интеграция энергосистем

В статье рассмотрены возможности интеграции гравитационного аккумулятора в ветряные электростанции для повышения стабильности энергоснабжения и эффективности использования энергии. Результаты показывают, что интеграция гравитационного аккумулятора позволяет снизить потери энергии на 15–20% и улучшить балансировку нагрузки в сети.

**Введение.** Ветряные электростанции (ВЭС) являются одним из ключевых источников возобновляемой энергии [1]. Однако их главный недостаток — нестабильность выработки из-за изменчивости ветровых условий. Это приводит к необходимости использования систем накопления энергии (СНЭ) для балансировки нагрузки и предотвращения потерь избыточной энергии. Гравитационные аккумуляторы представляют собой перспективное решение благодаря своей долговечности, экологичности и относительно низкой стоимости [2]. Задачей статьи является исследование возможности интеграции гравитационного аккумулятора в ВЭС [3] и оценка его влияния на эффективность системы.

**Цель работы.** Разработка математической модели взаимодействия ветрогенераторов и гравитационного аккумулятора. Анализ эффективности системы на основе численного моделирования. Оценка влияния гравитационного аккумулятора на балансировку нагрузки и снижение потерь энергии.

**Результаты исследования.** Рассмотрим процесс математического моделирования. Математическое описание энергии, вырабатываемой ветрогенератором, описывается формулой (1):

$$P_{\text{ветр}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p, \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность воздуха,  $A$  — площадь ротора (ветроколеса),  $v$  — скорость ветра,  $C_p$  — коэффициент мощности.

При интеграции систем баланс энергии рассчитывается по формуле (2):

$$P_{\text{ветр}} = P_{\text{нагрузка}} + P_{\text{заряд}}, \quad (2)$$

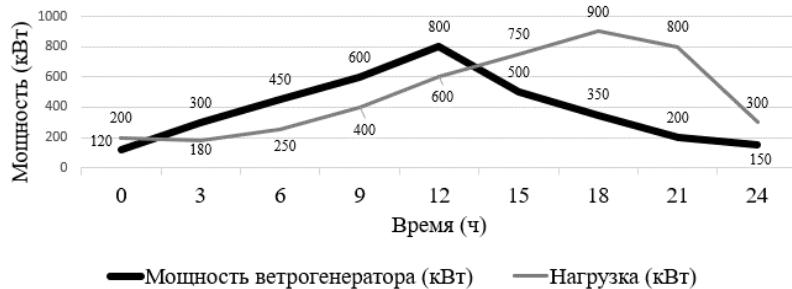
где  $P_{\text{нагрузка}}$  — мощность, потребляемая нагрузкой,  $P_{\text{заряд}}$  — мощность, направленная на зарядку аккумулятора.

При недостатке энергии в сети ( $P_{\text{ветр}} < P_{\text{нагрузка}}$ ) мощность рассчитывается по формуле (3):

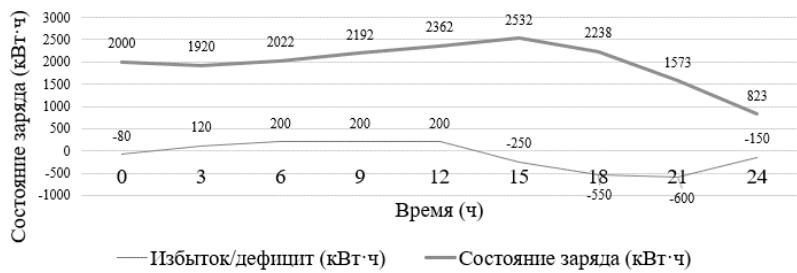
$$P_{\text{разряд}} = P_{\text{нагрузка}} - P_{\text{ветр}}, \quad (3)$$

где  $P_{\text{разряд}}$  — мощность, возвращаемая из аккумулятора.

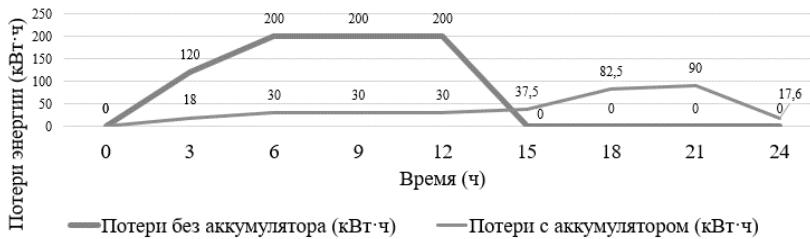
На основе данных о скорости ветра и нагрузке, полученных в ходе многолетних наблюдений на метеостанциях, проведено численное моделирование работы системы. Результаты моделирования изображены на графиках, представленных на рисунках: рисунок 1 показывает мощность ветрогенератора, где пиковые значения достигают своих максимальных показателей в дневное время, а нагрузка показывает пиковые значения утром и вечером; на рисунке 2 показано состояние аккумулятора, где из графических зависимостей видно, что рост происходит в периоды избытка энергии, а спад при разряде. На рисунке 3 представлен график потерь без использования аккумулятора (показаны высокие значения в дневное время), и потери с использованием гравитационного аккумулятора. Из графика на рисунке 3 видно, что потери значительно снижены.



**Рис. 1. Изменение мощности ветрогенератора и нагрузки в течение суток**



**Рис. 2. Динамика заряда и разряда гравитационного аккумулятора**



**Рис. 3. Сравнение потерь энергии в системе с аккумулятором и без него**

Анализ результатов моделирования показал эффективность системы интеграции гравитационного аккумулятора в ВЭС, которая позволила снизить потери энергии на 15–20%, а также улучшила

---

процесс балансировки нагрузки (пиковые нагрузки компенсировались за счет энергии аккумулятора).

**Выводы.** Исходя из результатов исследования можно сделать выводы, что интеграция гравитационного аккумулятора в ветряные электростанции позволяет повысить стабильность энергоснабжения и снизить потери энергии.

Математическая модель и численное моделирование подтвердили эффективность системы. Исходя из вышеизложенного можно сделать заключение, что гравитационные аккумуляторы являются перспективным решением для интеграции с возобновляемыми источниками энергии.

#### **Библиографический список:**

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/ ФГБОУ ВО «КУЗГТУ им. Т. Ф. Горбачева» – Кемерово, 2024 – с. 021420
2. 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: ФГБОУВО ВГТУ, 2024, с. 152-156
3. International Renewable Energy Agency (IRENA), 2024. Электронный ресурс – Режим доступа: <https://www.irena.org/%E2%80%A8>

**INTEGRATION OF GRAVITY BATTERY IN WIND POWER  
PLANTS**

**Sugak V.V.**

**Scientific supervisor – Chernykh T.E.  
Voronezh State Technical University**

***Keywords:*** *gravity battery, wind power plants, energy system integration*

*The article discusses the possibilities of integrating a gravity battery into wind power plants to improve the stability of energy supply and energy efficiency. The results show that the integration of a gravity battery can reduce energy losses by 15–20% and improve load balancing in the network.*