

УДК №624.311.22

О ВОЗМОЖНОСТИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ГИДРОГЕНЕРАТОРА ВАРЗОБ ГЭС – 3 С ГРАВИТАЦИОННОЙ АККУМУЛИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИЕЙ

¹М.В. Шамсиев, ²Д.Т. Мамаджанова, ²Ш.М. Султонзода

¹Филиал Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт» в г. Душанбе

²Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими

В работе рассматривается возможность построения гравитационной аккумуляющей электрической станции (ГРАЭС), оптимально сочетающей в себе достоинства твердотельной и гелио – аккумуляющей станции. Гравитационный эффект накопления энергии усиливается за счёт использования веса аккумуляторных батарей, синхронной машины, редукторов, металлоконструкций, солнечных панелей и сопутствующего электрооборудования. Анализируются режимы подъема и спуска платформы. Подчеркивается актуальность подобного подхода в природно-климатических условиях Республики Таджикистан и распространения подобного подхода к другим ГЭС.

Ключевые слова: гравитационная аккумуляющая электрическая станция, синхронная машина, редуктор, аккумуляторная батарея, солнечная панель.

ДАР БОРАИ ИМКОНЯТИ ЯҚОЯ ИСТИФОДА БАРИИ ГИДРОГЕНЕРАТОРИ НБО – И ВАРЗОБ – 3 БО НЕРҶОҶИ ГРАВИТАЦИОННИИ ЭЛЕКТРИК

М.В. Шамсиев, Д.Т. Мамаджанова, Ш.М. Султонзода

Дар мақола имконияти сохтани нерӯгоҳи электрикии ҷамъкунандаи гравитационӣ (НЭҶГР) баррасӣ мешавад, ки бехтарин хосиятҳои истиғои сахтҷасир ва офтобии ҷамъшавандаро дар худ муттаҳид мекунад. Таъсири гравитационӣ барои захираи энергия тавассути истифодаи вазни батареяҳои аккумуляторӣ, мошини синхронӣ, редукторҳо, сохтмонҳои металлӣ, панелҳои офтобӣ ва таҷҳизоти электрикии ҳамроҳ афзоиш меёбад. Ҳолатҳои бардошт ва фаромадани платформа таҳлил мешавад. Мухимияти чунин усул дар шароити табию иқлими Ҷумҳурии Тоҷикистон ва густариши он ба дигар нерӯгоҳҳои барқӣ таъкид карда мешавад.

Калимаҳои калидӣ: истиғои аккумулякунандаи гравитационӣ, мошини синхронӣ, редуктор, батареяи аккумуляторӣ, панели офтобӣ.

ON THE POSSIBILITY OF JOINT OPERATION OF THE VARZOB HPP-3 HYDROGENERATOR WITH AN ELECTRIC GRAVITY ACCUMULATING STATION

M.V. Shamsiev, D.T. Mamadjonova, Sh.M. Sultonzoda

The article assesses the possibility of constructing a gravity-based accumulating power station (GAPS), optimally combining the advantages of solid-state and helio storage stations. The gravity effect of energy accumulation is enhanced by the use of the weight of battery units, a synchronous machine, gear mechanisms, metal structures, solar panels, and associated electrical equipment. The modes of lifting and lowering the platform are analyzed. The relevance of this approach in the natural-climatic conditions of the Republic of Tajikistan and the potential spread of this approach to other hydroelectric power stations are emphasized.

Keywords: Gravity accumulating power station (GAPS), synchronous machine, gear mechanism, battery unit, solar panel.

С ростом мирового спроса на энергию и быстрым развитием возобновляемой энергетики роль технологии аккумулирования энергии в энергетической системе становится все более заметной. Ветряные, солнечные и другие возобновляемые источники энергии являются непостоянными и колеблющимися. Их широкомасштабное применение требует эффективных и надежных систем аккумулирования энергии для реализации стабильной поставки энергии. Гравитационное аккумулирование энергии, как технология, основанная на физических принципах, имеет уникальные преимущества по сравнению с другими методами хранения энергии, особенно с точки зрения длительного срока службы, большого масштаба аккумулирования энергии и экологичности [1].

В работе [2] проведен краткий обзор научных публикаций, где выделены основные известные типы накопителей электроэнергии. Приведены полученные основные эффекты от практического внедрения НЭЭ в электроэнергетику. Показано, что для энергетической системы Республики Таджикистан, где в зимний период наблюдается дефицит генерируемой мощности, применение системы НЭЭ может способствовать его снижению.

Основополагающий принцип технологии аккумулирования гравитационной энергии заключается в достижении преобразования между гравитационной потенциальной энергией и электрической энергией посредством подъема и опускания тяжелых предметов. Во время фазы подъема избыточная электрическая энергия преобразуется в гравитационную потенциальную энергию для хранения. При нехватке электроэнергии сохраненная гравитационная потенциальная энергия высвобождается и преобразуется обратно в электрическую энергию.

В работах [3-5] были наглядно показаны преимущества предлагаемой электрической гравитационной аккумуляющей станции, совмещающей в себе 3 принципа повышения эффективности, такие как :

- использование в качестве основного груза батареи аккумуляторов;

- использование в качестве дополнительного груза все механическое и электрооборудование станции (синхронная трехфазная электрическая машина, редукторы, трансформатор собственных нужд, коммутирующая аппаратура, инвертор и т.д.);

- а также на крыше платформы комплекс солнечных панелей.

Применительно к Варзоб ГЭС-3 с использованием перепада высот 40 метров возможно использование варианта ГРАЭС, наклоненного под 45 градусов к горизонту исполнения.

Известно, что значительную часть времени на Варзоб ГЭС-3 в работе находится лишь один гидрогенератор мощностью 1780 кВт на напряжение 6,3 кВ. Естественно, что мощность трехфазной синхронной электрической машины ГРАЭС не должна превышать мощность гидрогенератора Варзоб ГЭС-3. И если исходить из возможности режима использования всей мощности гидрогенератора Варзоб ГЭС-3 в режиме зарядки ГРАЭС, то можно выбрать синхронную машину для ГРАЭС исходя из стандартного класса напряжений – 6,3 кВ и возможности обеспечения ее пусковых токов. Подобный ориентировочный выбор дает нам: синхронный генератор-двигатель типа СГД2М-17-36-16УВ-УХЛ4 с нижеследующими техническими характеристиками: $P_H = 630$ кВт, $U_H = 6,3$ кВ, $I_H = 72$ А и т.д. Схема электрического совмещения выходной сети Варзоб ГЭС-3 и ГРАЭС приведена на рис.1.

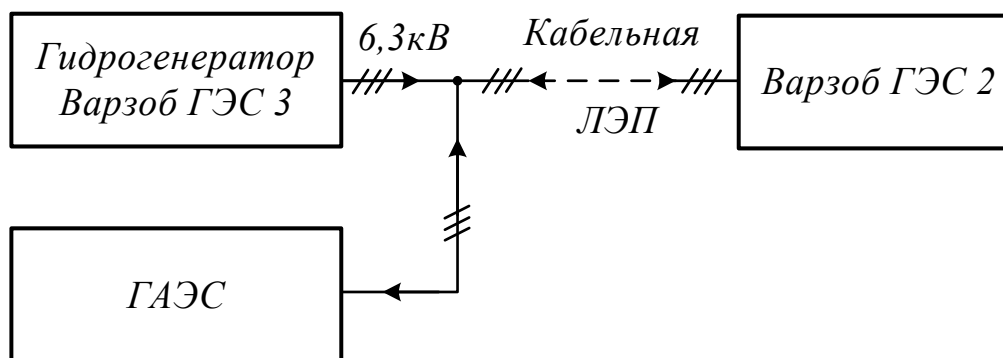


Рисунок 1 – Схема электрического совмещения выходной сети Варзоб ГЭС-3 и ГРАЭС

Мощность аккумуляторной батареи определяется также номинальной мощностью гидрогенератора Варзоб ГЭС-3. И соответственно количество и тип солнечных панелей определяется площадью крыши платформы, где установлены аккумуляторная батарея и электромеханическое оборудование ГРАЭС.

Параметры гидрогенератора: $P_H = 1780$ кВт, $U_H = 6,3$ кВ, $I_H = 204$ А, $\cos\varphi=0,8$

Перепад высот 40 м между нижней и верхней точками пути платформы. (рис.2)

$$S = \sqrt{40^2 + 40^2} = 56,4 \text{ м}$$

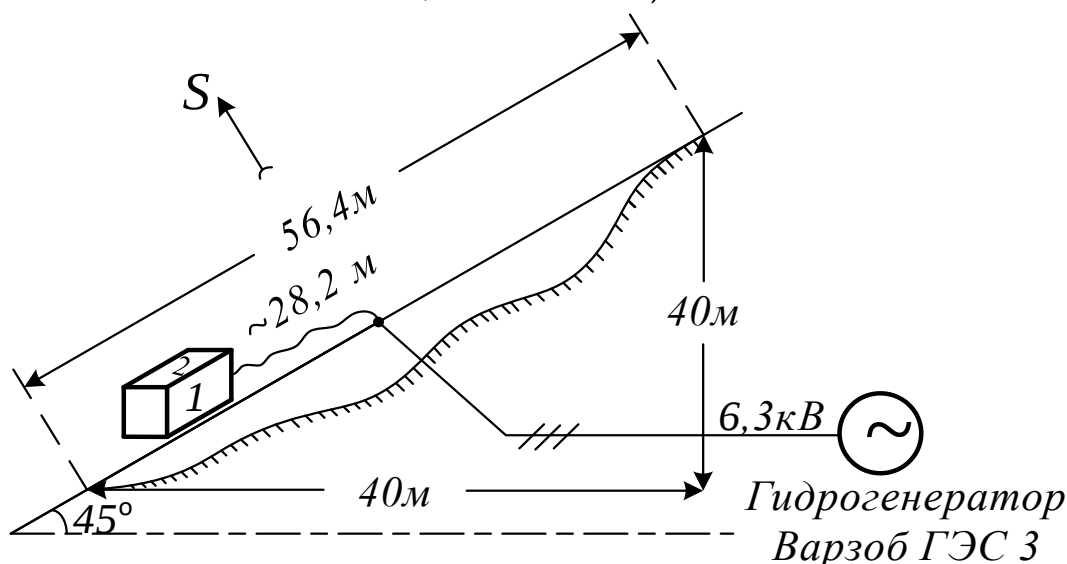


Рисунок 2 – Расположение пути платформы ГРАЭС.

Если считать допустимой кратковременную перегрузку гидрогенератора Варзоб ГЭС – 3 в 1,5 раза, то, $I_{\text{перепр}} = 1,5 \cdot 204 = 306$ А. Номинальный ток синхронной машины ГРАЭС приблизительно составит $I_H \approx \frac{306}{5} = 61,2$ А. Здесь предполагается пятикратный бросок пускового тока.

$$P_H = \sqrt{3} \cdot U_H \cdot I_H \cdot \cos \varphi_H$$

$$P_{\text{ГРАЭС}} = 6,3 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3} \cdot 61,2 \cdot 0,8 = 534247,6 \text{ Вт} \approx 534 \text{ кВт.}$$

Мощность синхронной машины ГРАЭС соответственно выбираем по каталогу [6] ближайшей синхронной машины с параметрами, указанными в табл.1.

Номинальный ток гидрогенератора:

$$I_H = \frac{P_H}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos \varphi_H} = \frac{1780 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 10^3 \cdot 0,8} = 204 \text{ А}$$

На первом этаже платформы располагаются:

- синхронная электрическая машина с двумя рабочими концами вала весом 5280 кг.
- два редуктора, соединенные с двумя рабочими концами вала синхронной машины. Технические параметры приведены в табл.2.

- трансформатор собственных нужд (ТСЗГЛФ11-100/10-У3) весом 850 кг.

- Выпрямитель ВТЕ-320/75 – УХЛ4, весом 850 кг

- Инвертор, весом 1000 кг.

- ТВУ, весом 450 кг.

- Шкафы управления и коммутации, общим весом 150 кг

На втором этаже платформы располагаются:

- АКБ – 250 А·ч – 12 В – 72 кг. Платформа размером 10х12 м, размеры аккумулятора – 0,296х0,52м, размещение аккумуляторов: 16 шт. в ширину, 30 шт. в длину. Общее количество аккумуляторов 480 шт. Общий вес – 480х72=34560 кг.

Крыша платформы состоит из солнечных панелей SM170-12P размерами 0,668х1,485 м Общее количество – 126 шт. 7шт. – в ширину, 18 шт.– в длину. Масса одной солнечной панели – 12 кг. Общий вес солнечных панелей – 126х12=1512 кг.

Масса металлоконструкций составляет 20% общего веса всей платформы.

Общий вес платформы с учетом металлоконструкций составляет:

$$\sum m = 5280 + 2960 + 850 + 850 + 1000 + 450 + 150 + 34560 + 1512 + 20\% = 57134,4 \text{ кг} \approx 60 \text{ т}$$

Таблица 1- Параметры синхронного генератора

Тип генератора	СГД2М-17-36-16УВ-УХЛ4
Мощность, кВт	630
Ток статора, А	72
Напряжение возбуждения В	58
Ток возбуждения, А	225
ОКЗ	0,84
КПД %	93,7
Момент инер-ции ротора кг· м ²	400
Напряжение обмотки статора, В	6300
Номинальная скорость, об/мин	375
Вес, кг	5280

Таблица 2 - Технические параметры редуктора

Тип редуктора	ЦТНД-500 (цилиндрический)
Передаточное число	100
Номинальная радиальная нагрузка на тихоходном валу (при скорости вращения 3,75 об/мин), Н	42200
Номинальный крутящий момент, Н·м	28500
КПД	0,96
Режим работы	Повторно-кратковременный
Масса, кг	1480

Вес двух редукторов – 2960 кг

Следует отметить, что комплекс: солнечные панели – аккумуляторная батарея, полностью обеспечивает питание роторной обмотки возбуждения синхронной машины (напряжение возбуждения 58 В, ток возбуждения 225 А), а установка ТСН с ТВУ гарантирует успешную работу и в период низкой солнечной активности.

Запасаемая энергия из 2-х составляющих:

1. Энергия АКБ – $250 \cdot 12 \cdot 480 = 1,44 \cdot 10^6$ ВА·ч $= 1,44 \cdot 10^6 \cdot 3600 = 5,184 \cdot 10^9$ Дж
2. За счет гравитации - $\sum m \approx 60$ т

Потенциальная энергия платформы, находящейся на вершине станции, т.е. $h=40$ метров составляет:

$$E_{\text{пот}} = mgh = 60 \cdot 10^3 \cdot 9,8 \cdot 40 = 23,52 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

Номинальная скорость синхронной машины $n_n = 375$ об/мин при передаточном числе редуктора $i=100$ скорость выходного вала редуктора $n_p = 3,75$ об/мин

На выходном валу редуктора устанавливается зубчатая шестерня с $D=1$ м, следовательно, длина окружности шестерни: $L=\pi D = 3,14$ м.

Линейная скорость перемещения платформы составит:

$$v_d = 3,75 \cdot 3,14 = 11,775 \text{ м/мин.}$$

Отсюда время подъема платформы к верхней точке:

$$t_n = \frac{56,4}{11,775} = 4,8 \text{ минут} = 288 \text{ сек}$$

Номинальный момент, развиваемый синхронной машиной:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{630 \cdot 10^3}{\frac{3,14 \cdot 375}{30}} = 16051 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Момент сопротивления:

$$M_c = \sum m \cdot \frac{D}{2} \cdot g = 60 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 9,8 = 29,4 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Момент сопротивления, приведенный к валу синхронной машины: (с учетом $i=100$)

$$M_{\text{спр}} = \frac{29,4 \cdot 10^4}{100} = 2940 \text{ Н} \cdot \text{м}, \text{ что значительно меньше } M_n.$$

Потребляемая из сети мощность (с учетом потерь):

$$P_c = \frac{3,14 \cdot 375}{30} \cdot 2940 = 115395 \text{ Вт} \approx 116 \text{ кВт}, \text{ что составляет } \frac{116}{630} \cdot 100\% = 18,4\%$$

от номинальной мощности синхронной машины. Таким образом, расход электроэнергии для подъема платформы:

$$\mathcal{E}_n = 116 \cdot 0,08 = 9,28 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Все вышеперечисленные выкладки касались режима подъема платформы.

При расчете режима опускания платформы возникают следующие вопросы:

1) Необходимо обеспечить номинальную скорость вращения вала синхронной машины, работающей в режиме генератора, т.е. 375 об/мин, т.к. в противном случае частота напряжения генератора будет отличаться от 50 Гц, что недопустимо. Упрощенный расчет, исходя из уравнения движения электропривода, показывает, что:

$$M_{\text{спр}} = j \frac{\Delta \omega}{\Delta t} = 2940 \text{ Н} \cdot \text{м} = 400 \frac{39,25 \cdot 9,8}{\Delta t}$$

$$\Delta t \approx 52,3 \text{ сек}$$

При этом будет развиваться мощность:

$$P_{\text{отпускания}} = \frac{E_{\text{пот}}}{\Delta t} = \frac{23,52 \cdot 10^6}{52,3} = 449713 \text{ Вт} \approx 450 \text{ кВт}$$

Линейная скорость движения платформы:

$$v_{\text{платф}} = \frac{56,4}{52,3} = 1,078 \text{ м/сек}$$

Определяющим при этом является ток нагрузки синхронной машины, скорость вращения может быть несколько большей 375 об/мин и для недопущения значительного повышения скорости можно задействовать регулировку цепи возбуждения.

2) При отсутствии тормозного действия синхронной машины (и если пренебречь силами трения), т.е. при режиме х.х., движение платформы вниз будет определяться уравнением:

$$S = \frac{gt^2}{2}: \text{ т.е. } 56,4 = \frac{9,8 \cdot t^2}{2} \quad t \approx 3,4 \text{ сек}$$

Скорость перемещения:

$$v_{\text{платф}} = \frac{56,4}{3,4} = 16,6 \text{ м/сек}$$

Это значительная (недопустимая) скорость перемещения, следовательно, спуск платформы возможен только при наличии нагрузки в энергосистеме.

Выводы

1. Разработка ГРАЭС для Варзоб ГЭС – 3 представляет безусловный интерес, с точки зрения повышения эффективности аккумуляции энергии и работы ГЭС.

2. Полученные результаты могут быть рекомендованы при проектировании ГРАЭС для совместной работы с другими ГЭС, что актуально для гидроэнергетики Таджикистана.

Рецензент: Назиров Х.Б. — к.т.н., доцент, зав.кафедрой электроэнергетики Филиала НИУ "МЭИ" в г. Душанбе.

Литература

1. Wang, Ronglu, Lu Zhang, Chenyang Shi, and Chunqiu Zhao. 2025. "A Review of Gravity Energy Storage" Energies 18, no. 7: 1812. <https://doi.org/10.3390/en18071812>

2. К вопросу интеграции водородных накопителей электроэнергии в энергосистему / Ф.М. Рахимов, О.С. Хабибов // Политехнический вестник. Серия: Серия Инженерные исследования. №1 (69), 2025. –Душанбе: ТТУ имени акад. М.С. Осими 2025. pp. 17-24.

3. Шамсиев М.В., Собиров Ф.С., Пардаев С.С. Разработка и исследование электрической части гелио – гравитационной аккумулирующей станции (ГГАС) мощностью 1МВт// Материалы международной научно-практической конференции «Электроэнергетика СНГ: современное состояние и перспективы развития», посвященной 32-летию независимости Республики Таджикистан и 10-летию филиала НИУ «МЭИ» в г. Душанбе // ДФ НИУ «МЭИ» // Душанбе, 2023 года. С. 8-12.

4. Шамсиев М.В., Собиров Ф.С., Пардаев С.С. Разработка и исследование системы бесперебойного электроснабжения потребителей при введении режимов отключения// Материалы международной научно – практической конференции: «Электроэнергетика Таджикистана» в г. Душанбе// ДФ НИУ «МЭИ»// Душанбе, 2024 года. С.65-68.

5. Шамсиев М.В., Абдулкеримов С.А., Шамсиев А.М. Патент РФ №2835283 «Электрическая гравитационная аккумулирующая станция»// Москва – 2025 г.

6. Копылова И.П. Справочник по электрическим машинам в 2–х томах // Москва-Энергоатомиздат, 1988 г.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ – МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН – INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Шамсиев Муқим Ваҳобович	Шамсиев Муқим Ваҳобович	Shamsiev Muqim Vahobovich
н.и.т., дотсент	к.т.н., доцент	PhD (Technical Sciences), Associate Professor
Донишгоҳи миллии тадқиқоти «ДЭМ», филиал дар ш. Душанбе (Ҷумҳурии Тоҷикистон)	Национальный исследовательский университет «МЭИ», филиал в г. Душанбе (Республика Таджикистан)	National Research University «MPEI», branch in Dushanbe (Republic of Tajikistan)
E-mail: muqim.shamsiev@gmail.com		
TJ	RU	EN
Мамадҷонова Дилноза Тоҳировна	Мамаджанова Дилноза Тоҳировна	Mamadjonova Dilnoza Tohirovna
Магистрант	Магистрант	Master's student
ДТТ ба номи академик М.С. Осимӣ	ТТУ имени академика М.С. Осими	TTU named after academician M.S. Osimi
E-mail: dilyadilyam.03@mail.ru		
TJ	RU	EN
Султонзода (Султонов) Шерхон Муртазо	Султонзода (Султонов) Шерхон Муртазо	Sultonzoda (Sultonov) Sherkhon Murtazo
н.и.т., дотсент	к.т.н., доцент	Candidate of technical Sciences, Associate Professor
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi
E-mail: sultonzoda.sh@mail.ru		