

Энергетика. Электротехника Energetics. Electrical engineering

Научная статья

УДК 620.92

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31301>



В.А. Пасека ✉, *Н.В. Коровкин*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ paseka.va@gmail.com

МОДЕЛИРОВАНИЕ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ ГИБРИДНОЙ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ С ХРАНЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ВОДОРОДА И СЖАТОГО ВОЗДУХА

Аннотация. Прогресс в рациональном использовании энергии подразумевает отказ от ископаемого топлива, и переход к использованию возобновляемых источников энергии (ВИЭ) неизбежен в текущем сценарии глобального потепления. Эффективное использование ВИЭ в энергетике возможно только с параллельным использованием систем аккумулирования энергии. Водород как перспективный энергоноситель открывает широкие возможности для создания эффективных и надежных систем хранения энергии, способных повысить стабильность и экономическую окупаемость альтернативной энергетики. Статья посвящена вопросам моделирования гибридной системы хранения энергии на основе водорода. Описаны блоки моделей электролизера, бака-накопителя и топливного элемента (ТЭ). Проведен анализ работы ТЭ в условиях переменного спроса и избыточной мощности, а также представлены результаты имитационного моделирования в ПК MATLAB/Simulink. Предложенная модель позволяет эффективно управлять балансом между генерацией и потреблением энергии в условиях нестабильности ВИЭ и обеспечивать надежное энергоснабжение в период дефицита генерации за счет обратного преобразования водорода в электричество. Выполнено сравнение эффективности использования хранения электроэнергии на основе водорода и сжатого воздуха.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, системы накопления электрической энергии, водородный накопитель, гибридная энергосистема, математическое моделирование, топливный элемент, электролизер.

Для цитирования:

Пасека В.А., Коровкин Н.В. Моделирование и сравнительный анализ систем гибридной выработки электроэнергии с хранением на основе водорода и сжатого воздуха // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 3. С. 7–21. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31301>



V.A. Paseka , N.V. Korovkin

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

 paseka.va@gmail.com

MODELING AND COMPARATIVE ANALYSIS OF HYBRID ELECTRIC POWER GENERATION SYSTEMS USING HYDROGEN AND COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE

Abstract. Progress in the rational use of energy implies abandoning fossil fuels, and the transition to renewable energy sources (RES) is inevitable in the current scenario of global warming. Efficient utilization of RES in the energy sector is possible only with the parallel use of energy storage systems. Hydrogen as a promising energy carrier opens up vast opportunities for creating efficient and reliable energy storage systems capable of enhancing the stability and economic viability of alternative energy. This article focuses on modeling a hybrid hydrogen-based energy storage system. It describes the model blocks of an electrolyzer, a storage tank and a fuel cell (FC). An analysis of the FC operation under variable demand and excess power conditions is provided, along with the results of simulation modeling in MATLAB/Simulink. The proposed model enables effective management of the balance between energy generation and consumption amid RES instability and ensures reliable power supply during generation shortages by converting hydrogen back into electricity. The efficiency of using hydrogen-based and compressed air-based energy storage has been compared.

Keywords: renewable energy sources, electric energy storage systems, hydrogen storage, hybrid energy system, mathematical modeling, fuel cell, electrolyzer.

Citation:

Paseka V.A., Korovkin N.V., Modeling and comparative analysis of hybrid electric power generation using hydrogen and compressed air energy storages, *Global Energy*, 31 (03) (2025) 7–21, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31301>

Введение. Рост населения и быстрая урбанизация приводят к увеличению спроса на энергию, для удовлетворения которого системы генерации, функционирующие на основе ископаемого топлива, выбрасывают в окружающую среду парниковые газы, ускоряя глобальное потепление [1]. Поэтому разработки альтернативных методов получения энергии с помощью экологически чистых технологий весьма актуальны. Также с ростом цен на традиционные энергоресурсы актуальной становится независимость промышленных отраслей и стран в целом в энергетическом секторе. Это определяет рост интереса к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ), на долю которых, по данным Международного энергетического агентства, к 2028 г. будет приходиться от 42% мировой генерации [2].

ВИЭ способны удовлетворить растущий спрос на энергию, однако ее хранение представляет собой проблему из-за колеблющегося спроса и предложения. В силу своей нестабильности ВИЭ не могут эффективно работать без надежных систем накопления, которые позволяют сглаживать перепады генерации и обеспечивать стабильность энергоснабжения [3, 4].

Сегодня в разработке находится несколько альтернативных способов хранения энергии, среди которых водород рассматривается как один из наиболее перспективных [5]. Системы хранения энергии на основе водорода тестируются и пока не вышли на промышленный уровень, и исследования, связанные с их моделированием и повышением эффективности, являются актуальными [6, 7].

В работах [8–10] предложены подходы к созданию автономных энергосистем с водородными накопителями, позволяющими эффективно сглаживать пиковые нагрузки и повышать устойчивость энергоснабжения, а исследования [11–13] посвящены моделированию энергосистем с водородными накопителями с использованием современных инструментов симуляции, что позволяет оптимизировать их параметры для различных условий эксплуатации (режимы генерации/потребления).

Несмотря на активный интерес ученых к системам хранения энергии на основе водорода, ряд вопросов исследован недостаточно. В частности, требует дальнейшей разработки многоуровневый метод управления мультиэнергетической комплементарной системой ветер-солнце-аккумулятор, который должен обеспечивать как стабильность энергоснабжения, так и эффективное использование генерирующих мощностей. Отдельного внимания заслуживает задача разработки математической модели системы, которая включает электролизер, топливный элемент (ТЭ), необходимые резервуары для водорода, кислорода и воды.

В данном исследовании рассмотрены следующие задачи:

1. Разработка математических моделей ключевых компонентов системы: электролизера, бака-накопителя водорода и ТЭ.
2. Анализ поведения гибридной системы хранения на основе водорода при колебаниях спроса на электроэнергию и избыточной мощности в сети.
3. Сравнение водородного накопителя с системой хранения энергии на основе сжатого воздуха по ключевым характеристикам, включая экономическую эффективность, экологичность и масштабируемость.

Целью статьи являются разработка и анализ математической модели гибридной системы хранения энергии на основе водорода, интегрированной с ВИЭ, для сравнения с альтернативными технологиями хранения, такими как системы хранения энергии на основе сжатого воздуха.

Описание модели

Рассмотрим комплементарную систему гибридной солнечно-водородной энергии, в которой объединены солнечная генерация, электролитическое производство водорода из воды и система ТЭ (рис. 1). Водород, получаемый электролизом воды, используется в качестве энергоносителя. Энергия для получения водорода генерируется ВИЭ. Водород хранится в сосудах высокого давления, в жидком виде или в виде гидридов определенных материалов. На сегодня самым изученным и доступным является гидрид магния (MgH_2) [14].



Рис. 1. Мультиэнергетическая комплементарная система хранения энергии на основе водорода

Fig. 1. Multi-energy complementary hydrogen-based energy storage system

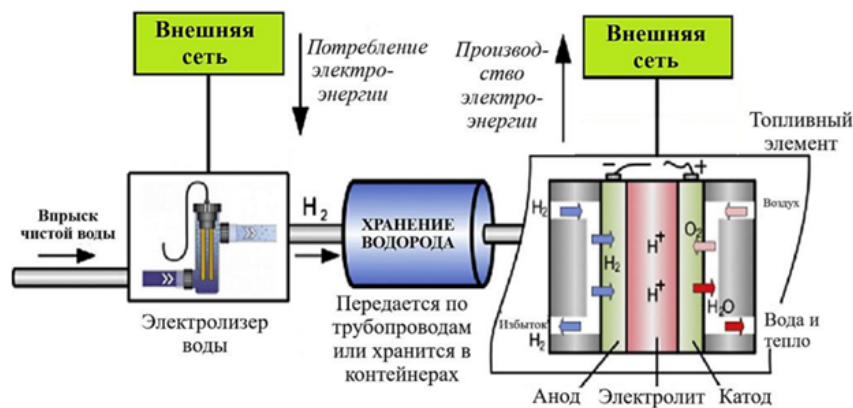


Рис. 2. Топология системы хранения водорода

Fig. 2. Topology of the hydrogen storage system

ТЭ являются незаменимой частью системы хранения водорода, выполняя функцию прямого преобразования химической энергии водорода в электричество без процесса горения [15]. ТЭ предлагают альтернативу сжиганию топлива, обладают высокими энергетическими характеристиками и уже нашли свое применение в крупномасштабных пилотных проектах систем хранения электрической энергии. Структурная схема работы системы хранения на основе водорода представлена на рис. 2.

Моделирование солнечных фотоэлектрических систем

Солнечный фотоэлектрический преобразователь конвертирует энергию солнца в электричество постоянного тока. Мощность, вырабатываемая солнечной батареей, определяется по формуле (1); КПД и температура ячейки солнечного фотоэлектрического элемента определяются уравнениями (2) и (3) соответственно:

$$P_{vt}(t) = G(t) \cdot A_{pv} \cdot \eta_{pv}(t); \quad (1)$$

$$\eta_{pv}(t) = \eta_{pv,ref} (1 - \alpha (T_c(t) - T_{ref})); \quad (2)$$

$$T_c = T_{amb}(t) + G(t) \left[\frac{NOCT - 298.15}{800} \right], \quad (3)$$

где $P_{vt}(t)$ – электрическая мощность, вырабатываемая солнечной батареей (Вт); $G(t)$ – солнечное излучение ($\text{Вт}/\text{м}^2$); A_{pv} – площадь солнечной панели (м^2); $\eta_{pv}(t)$ – часовой КПД солнечной панели, который изменяется в зависимости от температуры ячейки (%); $\eta_{pv,ref}$ – КПД солнечной панели в условиях испытаний (%); α – температурный коэффициент при максимальной мощности ($1/\text{K}$); $T_c(t)$ – часовая температура ячейки (K); T_{ref} – температура в условиях испытания (K); $T_{amb}(t)$ – температура окружающей среды (K); $NOCT$ – номинальная рабочая температура ячейки (K).

Хранение водорода

Существует несколько технологий хранения водорода (табл. 1). Наиболее популярными являются технологии хранения сжатого газообразного и сжиженного водорода [16]. Водород, обладающий высокой энергоемкостью ($120 \text{ МДж}/\text{кг}$) и низкой плотностью ($0,0899 \text{ кг}/\text{м}^3$ при нормальных условиях), может быть сжат до 700 бар, что значительно повышает его удельную

Таблица 1

Table 1

Сравнение различных технологий хранения водорода

Comparison of different hydrogen storage technologies

Технология	Энергоэффективность	Плюсы	Минусы	Применение
Сжатый газобразный водород	85–90%	Быстрая зарядка/разрядка; Относительно низкие капитальные затраты	Низкая плотность энергии; Высокие энергозатраты на сжатие (до 10–15% энергии); Риск утечек при длительном хранении	Подходит для кратковременного хранения (часы/дни)
Сжиженный водород	60–70%	Высокая плотность энергии; Возможность транспортировки на большие расстояния	Огромные энергозатраты на сжижение (до 30% энергии); Потери на испарение (0,1–1% в сутки); Дорогая криогенная инфраструктура	Экономически оправдан только для специфических применений (например, для ВИЭ)
Металл-гидриды	70–80%	Безопасность (низкое давление); Компактность (высокая объемная плотность)	Низкая гравиметрическая плотность (не подходит для больших мощностей); Требуется нагрев для выделения водорода (дополнительные энергозатраты); Медленная кинетика зарядки/разрядки	Подходит для небольших стационарных систем, но не для масштабной энергетики
Жидкие органические носители	60–70%	Безопасность; Совместимость с нефтехимической инфраструктурой; Возможность хранения месяцами без потерь	Требуется энергия для дегидрирования (до 30% энергии водорода); Побочные продукты (деградация носителя); Низкая эффективность	Перспективно для сезонного хранения и экспорта
Подземное хранение (соляные каверны, водоносные пласты)	90–95%	Огромные объемы (аналогично хранению природного газа); Низкая стоимость (\$ 1–3 за 1 кг); Минимальные потери	Ограниченная география (требуются подходящие геологические формации); Риск взаимодействия водорода с породой/микроорганизмами	Подходит для крупномасштабного хранения (ГВт·ч – ТВт·ч)

энергоемкость на единицу объема и позволяет компактно хранить большие количества водорода в баллонах и резервуарах, уменьшая затраты на транспортировку и инфраструктуру [17]. Технология твердофазного хранения находится в процессе разработки, и в ближайшие десятилетия ожидается ее широкое применение.

В проводимом исследовании используется технология хранения сжатого газообразного водорода с рабочим давлением 30 бар. Предлагается использовать три резервуара: для водорода, кислорода и воды. Для электролизера необходимы вода и электричество для производства кислорода и водорода, которые хранятся в первых двух резервуарах. Для получения электрической энергии ТЭ потребляет из этих резервуаров водород и кислород. Вода, полученная в результате работы ТЭ, хранится в резервуаре и затем поступает в электролизер. Цикл продолжается в зависимости от цикла зарядки и разрядки системы. Мгновенное давление в баке описывается уравнением (4), а формула для коэффициента сжимаемости – уравнением (5):

$$P_t - P_{ii} = \frac{Z_c N_{H_1} R T_t}{M_{H_2} V_t}; \quad (4)$$

$$Z_c = \frac{P_t V_m}{R T_t}, \quad (5)$$

где P_t – давление в водородном баке (Па); P_{ii} – начальное давление в водородном баке (Па); Z_c – коэффициент сжимаемости; N_{H_1} – количество водорода, подаваемого в резервуар (моль/с); R – универсальная газовая постоянная (Дж моль/К); M_{H_2} – молярная масса водорода (кг/моль); V_t – объем резервуара (м³); T_t – температура резервуара (К); V_m – молярный объем водорода (м³/моль).

Расход и производство каждой жидкости определяются уравнениями (6)–(8):

$$Q_{H_2}(t + \Delta t) = Q_{H_2}(t) + [F_{H_2}^p(t) + F_{H_2}^c(t) - L_{H_2}] \Delta t; \quad (6)$$

$$Q_{O_2}(t + \Delta t) = Q_{O_2}(t) + [F_{O_2}^p(t) + F_{O_2}^c(t) - L_{O_2}] \Delta t; \quad (7)$$

$$Q_{H_2O}(t + \Delta t) = Q_{H_2O}(t) + [F_{H_2O}^p(t) + F_{H_2O}^c(t)] \Delta t, \quad (8)$$

где Q_{H_2} , Q_{O_2} , Q_{H_2O} – количества водорода, кислорода, воды в резервуаре (кг) соответственно; $F_{O_2}^p$ – произведенный кислород (кг/с); $F_{O_2}^c$ – потребление кислорода (кг/с); L_{O_2} – потери кислорода (кг/с); $F_{H_2}^p$ – вырабатываемый водород (кг/с); $F_{H_2}^c$ – потребление водорода (кг/с); L_{H_2} – потери водорода (кг/с); $F_{H_2O}^p$ – произведенная вода (кг/с); $F_{H_2O}^c(t)$ – потребление воды (кг/с).

Модель электролизера

Согласно закону Тафеля, напряжение на ячейке электролизера связано с плотностью тока j соотношением [18]:

$$U_{яч} = E_p + a + b \log \left(\frac{I}{I_0} \right) + cI, \quad (9)$$

где E_p – минимальное напряжение, необходимое для протекания электролиза в идеальных условиях (В); I – сила тока электролизера (А); I_0 – сила тока, при которой перенапряжение равно нулю (А).

Параметры a , b и c определяются характеристиками (геометрия, мембрана, поток, материалы, температура и давление) ячейки электролизера.

Зависимость напряжения от тока с s и p — количеством ячеек при последовательном и параллельном соединении — на основе закона Тафеля определяется следующим уравнением [19]:

$$U_3 = s \cdot \left(E_p + \left(a + b \log \left(\frac{I_e}{p \cdot I_0} \right) + c \frac{I_e}{p} \right) \right), \quad (10)$$

где U_3 — общее напряжение электролизера, I_e — общий ток электролизера.

В системах хранения энергии на основе водорода применяются три основных типа электролизеров:

- с протонообменной мембраной (proton-exchange membrane, PEM) — используют твердые полимерные электролиты. Обладают быстрым откликом (минуты), высокой плотностью тока и высоким показателем чистого выходного водорода (>99,95%). Подходят для работы с нестабильными ВИЭ [20];
- щелочные — используют жидкие электролиты. Обладают достаточно низкой стоимостью материалов, медленно реагируют на изменения внешней нагрузки, требуют дополнительной очистки водорода [21];
- твердооксидные — работают при высоких температурах (700–800°), работают с высоким КПД (≈90%), но при этом обладают длительным запуском (часы) и имеют проблемы с долговременной стабильностью [22].

В данной статье рассматривается PEM-электролизер как наиболее подходящий для гибридных систем с ВИЭ благодаря быстрому отклику.

Полученная модель приведена для исследования системы гибридного хранения энергии на основе водорода с целью анализа ее эффективности в условиях переменного спроса и избыточной мощности. Модель реализована в среде MATLAB/Simulink с учетом работы ключевых компонентов системы, в том числе электролизера, бака-накопителя водорода и ТЭ.

Результаты

Исследуемая система — это гибридный электрохимический водородный накопитель на основе PEM-технологий с хранением сжатого газообразного водорода, оптимизированный для интеграции с солнечной электростанцией. Основные параметры водородного накопителя приведены в табл. 2. Моделирование водородного накопителя и DC/DC преобразователя с динамической системой управления было выполнено в MATLAB/Simulink и представлено на рис. 3.

Для тестирования предложенной модели предлагается автономная сеть постоянного тока, включающая солнечную электростанцию (СЭС) и активную нагрузку с переменным потреблением. Данная конфигурация позволяет исследовать работу системы в условиях реальной эксплуатации, когда мощность генерации СЭС зависит от уровня солнечной инсоляции, а нагрузка меняется в течение дня.

Входным сигналом модели водородного накопителя является активная мощность в сети (избыток/дефицит) (рис. 4). Для анализа работы системы предусмотрен характерный режим работы внешней сети в промежутке времени от 10:00 до 13:00. В начальный момент времени мощность нагрузки превышает генерируемую мощность СЭС в связи низким уровнем инсоляции в начале дня (10:00–10:20), далее с повышением инсоляции преобладает генерируемая мощность СЭС (10:20–12:20), после чего происходит рост нагрузки, способствующий дефициту мощности в сети. Предполагается, что в начальный момент времени запасенная энергия водородного накопителя равна $W_{H2} = 4$ кВт·ч.

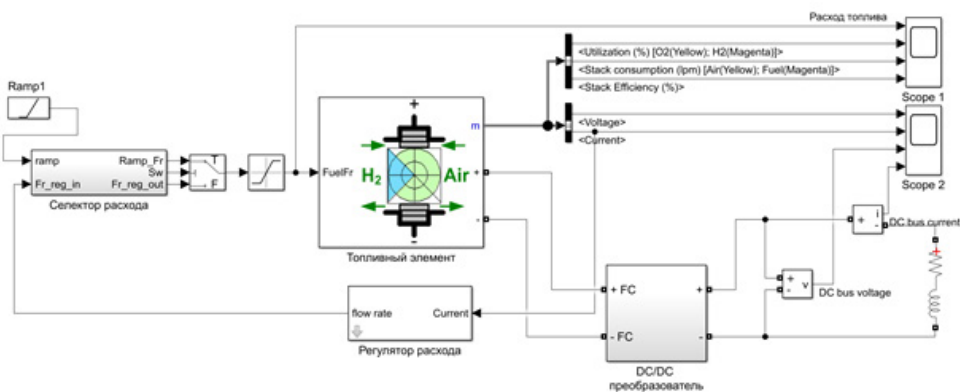


Рис. 3. Модель системы топливных элементов в MATLAB/SIMULINK

Fig. 3. Fuel Cell System Model in MATLAB/SIMULINK

Таблица 2

Основные параметры водородного накопителя

Table 2

The main parameters of the hydrogen storage

Параметры	Значение
Тип накопителя	Электрохимический (электролизер + ТЭ)
Максимальная емкость	15 кВт·ч
Рабочее давление	30 бар
Тип электролизера	РЕМ-электролизер
Максимальная рабочая мощность	8 кВт
Минимальная рабочая мощность	0,5 кВт
КПД (при номинальной нагрузке)	68%
Время выхода на режим	4,5 мин
Тип ТЭ	РЕМFC
Максимальная рабочая мощность	6 кВт
Минимальная рабочая мощность	0,5 кВт
КПД (при номинальной нагрузке)	50%
Время отклика	2,8 мин

Результаты, представленные на рис. 4, отображают работу водородного накопителя в режиме электролизера или ТЭ в зависимости от мощности в сети. В период дефицита мощности (10:00–10:20 и после 12:20) ТЭ активируется, преобразуя запасенный водород в электричество для компенсации дефицита. Однако при низком дефиците мощности ТЭ не включается по следующим причинам:

- *Порог срабатывания.* ТЭ имеет минимальную рабочую мощность (0,5 кВт, см. табл. 2). Если дефицит меньше этого значения, система игнорирует его из-за низкого КПД и инерционности процесса.
- *Длительное время отклика* (2,8 мин, см. табл. 2). ТЭ не может мгновенно реагировать на кратковременные колебания, поэтому система имеет небольшой дисбаланс по мощности.

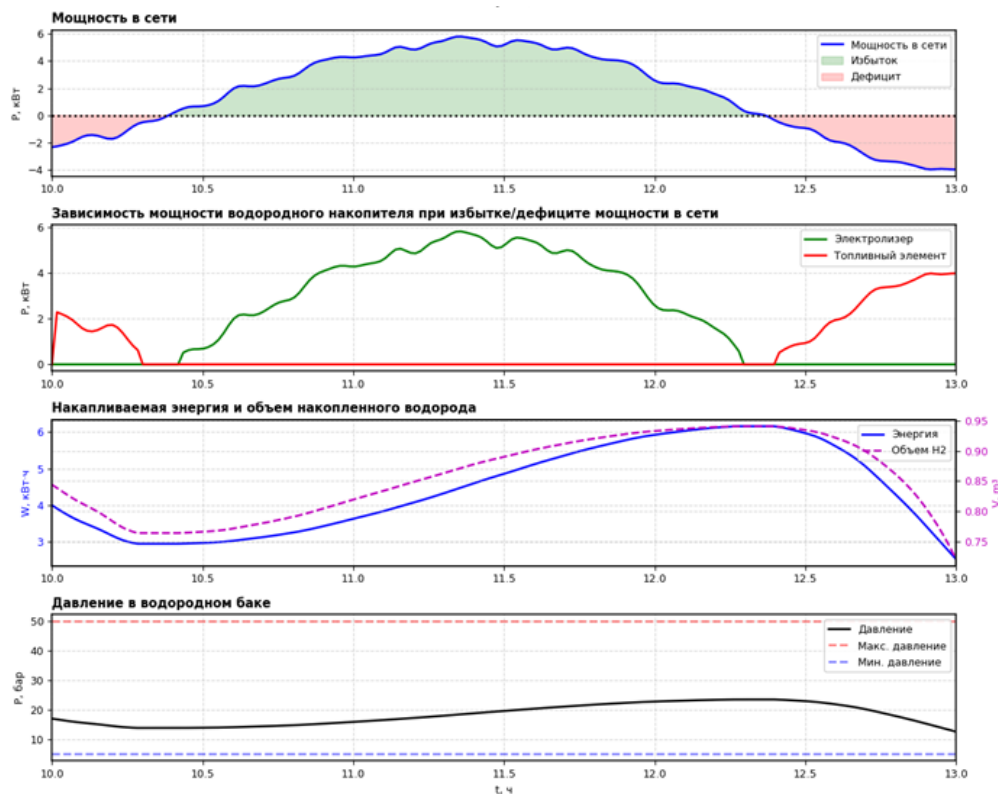


Рис. 4. Работа водородного накопителя

Fig. 4. Operation of the hydrogen storage

В период избытка мощности (10:20–12:20) включается электролизер, потребляя избыточную энергию для производства водорода. Однако при низком избытке мощности электролизер не запускается по следующим причинам:

- *Минимальная рабочая мощность* (0,5 кВт, см. табл. 2). Если избыток меньше этого значения, то экономически нецелесообразно его использовать (КПД электролиза падает при малых нагрузках).
- *Длительное время отклика* (4,5 мин, см. табл. 2). Запуск электролизера требует времени достаточно продолжительного времени.

Изменение накапливаемого водорода происходит не прямо пропорционально накапливаемой энергии в связи с непостоянством КПД РЕМ-электролизера, который имеет КПД 68% (при номинальной нагрузке), но его эффективность снижается при неполной загрузке. При малой мощности (близкой к минимальной 0,5 кВт) увеличиваются потери на нагрев, перенапряжение электродов и паразитные токи, что приводит к снижению доли энергии, идущей на производство водорода.

Проведенное моделирование гибридной системы хранения энергии на основе водорода продемонстрировало ее работоспособность и эффективность в условиях переменной генерации СЭС и изменяющейся нагрузки в сети. Система успешно выполняет свои функции: в периоды избыточной генерации электролизер преобразует избыточную энергию в водород с КПД до 68%, а при дефиците мощности ТЭ обеспечивает энергоснабжение с КПД 50%. Однако присутствуют технологические ограничения, включая минимальные пороги мощности (0,5 кВт) для работы водородного накопителя, заметную инерционность процессов (2,8–4,5 мин) и снижение эффективности при работе на неполной мощности.

Таблица 3

Сравнение характеристик водородного накопителя и CAES

Table 3

Comparison of the characteristics of a hydrogen storage device and a CAES

Характеристика	Водородный накопитель	CAES
Принцип работы	Электролиз воды → хранение H_2 → ТЭ	Сжатие воздуха → хранение → расширение через турбину
КПД системы	40–60%	50–70% (до 75% для адиабатических систем)
Капитальные затраты	1000–3000 \$/кВт	600–1500 \$/кВт
Срок окупаемости	10–20 лет	5–10 лет
Объем газа на 1 кВт ч	0,025 м ³	0,3 м ³
Время хранения	Долгосрочное (сезонное)	Среднесрочное (часы/дни)
Масштабируемость	Подходит для автономных систем и транспорта	Требует крупных геологических хранилищ
Экологичность	Нулевые выбросы (при использовании ВИЭ)	Возможны выбросы CO_2 (в традиционных системах)
Время отклика	Несколько минут	Несколько минут
Типичная мощность	От кВт до МВт	От десятков МВт до ГВт
Требования к инфраструктуре	Специальные резервуары для H_2 , ТЭ	Подземные хранилища (соляные каверны и др.)

Сравнение водородного накопителя и накопителя со сжатым воздухом

К наиболее распространенным системам хранения энергии относятся литий-ионные аккумуляторы, проточные батареи, гидроаккумулирующие станции (ГАЭС) и системы на основе сжатого воздуха (Compressed-air energy storage, CAES) [23]. Однако технологически близким аналогом водородных накопителей по ключевым критериям являются CAES: обе системы относятся к механико-химическим методам хранения большой мощности и ориентированы на долгосрочную аккумуляцию энергии, используют газообразную среду (водород/воздух) для регенерации в электричество, что позволяет корректно сравнивать их КПД, плотность энергии и параметры хранения, обусловленные схожими инфраструктурными требованиями (компрессоры, хранилища высокого давления).

Водородные накопители и CAES используют разные принципы аккумулирования энергии. В отличие от водородных систем, в CAES сжимается воздух для аккумулирования в хранилищах с последующим преобразованием в электрическую энергию за счет расширения через турбину. Эта технология лучше подходит для среднесрочного хранения и балансировки нагрузки в крупных энергосистемах [24].

При выборе системы хранения энергии для интеграции с ВИЭ ключевым фактором является экономическая эффективность. Водородные накопители и CAES существенно различаются по капитальным затратам (Capital expenditure, CAPEX), сроку окупаемости и стоимости хранения энергии. CAES дешевле в CAPEX (на 30–50%), особенно при использовании подземных хранилищ. Водородные системы дороже из-за стоимости электролизеров и ТЭ [6, 25]. Соответственно, срок окупаемости водородных систем также выше, чем у CAES.

По сравнению с системами CAES водород обладает значительно меньшей плотностью, чем воздух, что обуславливает необходимость использования больших объемов для хранения

сжатого воздуха. Для аккумулирования энергии, равной $W = 1$ кВт·ч, требуемый объем газа составляет $V_{\text{возд}} \approx 0,3$ м³ в случае CAES [26], тогда как для водородных систем достаточно $V_{\text{H}_2} \approx 0,025$ м³ в соответствии с результатами, представленными на рис. 4.

Основные характеристики водородных накопителей и CAES наглядно представлены в табл. 3.

Сравнение систем хранения водорода и CAES (табл. 3) выявило существенные различия в их характеристиках и области применения. Водородные системы обладают преимуществами с точки зрения высокой энергоемкости и экологичности (нулевые выбросы при использовании ВИЭ) и гибкости применения (от небольших автономных систем до транспортировки), но они уступают CAES с точки зрения экономической эффективности (капитальные затраты выше на 30–50%) и КПД (40–60% против 50–70%). С другой стороны, CAES более выгодны для крупномасштабного среднесрочного хранения энергии в энергосистемах, хотя требуют специальной геологической инфраструктуры.

Заключение

В статье проведено исследование гибридной системы хранения энергии на основе водорода, интегрированной с СЭС. Разработаны математические модели ключевых компонентов системы, включая электролизер, бак-накопитель водорода и ТЭ, что позволило проанализировать работу водородного накопителя в условиях дефицита и профицита мощности в сети. Результаты имитационного моделирования в MATLAB/Simulink подтвердили работоспособность и адекватность предложенной системы в управлении балансом между генерацией и потреблением энергии.

Сравнение системы хранения водорода с системой накопления энергии на сжатом воздухе выявило ключевые преимущества и недостатки каждой технологии. Водородные системы отличаются высокой энергоемкостью, экологичностью, гибкостью применения и подходят для длительного хранения, но они уступают CAES с точки зрения экономичности и результативности. С другой стороны, CAES более выгодны для крупномасштабного среднесрочного хранения, но требуют специальной инфраструктуры и могут привести к выбросам CO₂.

Проведенное исследование подтвердило перспективность водородных накопителей для интеграции с ВИЭ, особенно в автономных и распределенных энергосистемах. Дальнейшие работы могут быть направлены на оптимизацию параметров системы, снижение капитальных затрат и улучшение динамических характеристик компонентов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Sahoo B., Behera D.K., Rahut D. Decarbonization: examining the role of environmental innovation versus renewable energy use, *Environmental Science and Pollution Research*, 29 (2022) 48704–48719. DOI: 10.1007/s11356-022-18686-1
- [2] International Energy Agency, *Renewables 2023*, (2024). Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023> (дата обращения: 30.06.2025)
- [3] Lv Y., Qin R., Sun H., Guo Z., Fang F., Niu Y. Research on energy storage allocation strategy considering smoothing the fluctuation of renewable energy, *Frontiers in Energy Research*, 11 (2023). DOI: 10.3389/fenrg.2023.1094970
- [4] Jiang T., Shen D., Zhang Z., Liu H., Zhao G., Wang Y., Tan S. Luo R., Chen W. Battery technologies for grid-scale energy storage, *Nature Reviews Clean Technology*, 1 (2025) 474–492. DOI: 10.1038/s44359-025-00067-9
- [5] Ersoy H., Baumann M., Barelli L., Ottaviano A., Trombetti L., Weil M., Passerini S. Hybrid energy storage and hydrogen supply based on aluminum – a multiservice case for electric mobility and energy storage services, *Advanced Materials Technologies*, 7 (8) (2022) 2101400. DOI: 10.1002/admt.202101400

- [6] Мартянов А.С., Терехин А.А., Исмаилов Д.Р., Ян Ю., Ковалев А.А., Рявкин Г.Н., Мирошниченко А.А., Кичатов В.В. Теоретическое и экспериментальное исследование ветроэнергетической установки с водородным накопителем // *Альтернативная энергетика и экология*. 2021. № 25–27. С. 72–89. DOI: 10.15518/isjaee.2021.09.072-089
- [7] Lebrouhi B.E., Djoupo J.J., Lamrani B., Benabdelaziz K., Kousksou T. Global hydrogen development – A technological and geopolitical overview, *International Journal of Hydrogen Energy*, 47 (11) (2022) 7016–7048. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.12.076
- [8] Alzahrani A., Ramu S.K., Devarajan G., Vairavasundaram I., Vairavasundaram S. A Review on hydrogen-based hybrid microgrid system: Topologies for hydrogen energy storage, integration, and energy management with solar and wind energy, *Energies*, 15 (21) (2022) 7979. DOI: 10.3390/en15217979
- [9] Попов С.П., Шакиров В.А., Колосницын А.В., Максакова Д.В., Балдынов О.А. Техничко-экономическая модель автономного комплекса по производству «зеленого» водорода и ее апробация на примере Монголии и Японии // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2022. Т. 333, № 11. С. 124–139. DOI: 10.18799/24131830/2022/11/3773
- [10] Карасевич В., Васильев Ю., Негримовский В. Перспективы автономного энергоснабжения изолированных объектов и поселений в арктических регионах РФ с применением водородных технологий // *Энергетическая политика*. 2023. Т. 188, № 9. С. 62–69. DOI: 10.46920/2409-5516_2023_9188_62
- [11] Abdollahipour A., Sayyaadi H. Optimal design of a hybrid power generation system based on integrating PEM fuel cell and PEM electrolyzer as a moderator for micro-renewable energy systems, *Energy*, 260 (2022) 124944. DOI: 10.1016/j.energy.2022.124944
- [12] Mohammed A., Ghaithan A.M., Al-Hanbali A., Attia A.M. A multi-objective optimization model based on mixed integer linear programming for sizing a hybrid PV-hydrogen storage system, *International Journal of Hydrogen Energy*, 48 (26) (2023) 9748–9761. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.12.060
- [13] Pignataro V., Liponi A., Bargiacchi E., Ferrari L. Dynamic model of a power-to-gas system: Role of hydrogen storage and management strategies, *Renewable Energy*, 230 (2024) 120789. DOI: 10.1016/j.renene.2024.120789
- [14] Xie X., Chen M., Hu M., Wang B., Yu R., Liu T. Recent advances in magnesium-based hydrogen storage materials with multiple catalysts, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (21) (2019) 10694–10712. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.02.237
- [15] Исса Х.А., Муровский С.П., Шахова Н.В., Гусева Е.В., Кувшинов В.В. Комбинированная энергетическая система с использованием фотоэлектрических преобразователей и топливных элементов // *Энергетические установки и технологии*. 2024. Т. 10, № 3. С. 56–62.
- [16] Naquash A., Agarwal N., Lee M. A review on liquid hydrogen storage: Current status, challenges and future directions, *Sustainability*, 16 (2024) 8270. DOI: 10.3390/su16188270
- [17] Pillai K., Sundaram S. Optimization and feasibility analysis of hybrid distributed generator based system with a comparison of battery and hydrogen energy storage for residential electrification, *Energy Storage*, 6 (8) (2024) e70075. DOI: 10.1002/est2.70075
- [18] Sarwar F.A., Hernando-Gil I., Vechiu I. Review of energy management systems and optimization methods for hydrogen-based hybrid building microgrids, *Energy Conversion and Economics*, 5 (4) (2024) 259–279. DOI: 10.1049/enc2.12126
- [19] Sifakis N., Vichos E., Smaragdakis A., Zoulias E., Tsoutsos T. Introducing the cold-ironing technique and a hydrogen-based hybrid renewable energy system into ports, *International Journal of Energy Research*, 46 (2022) 20303–20323. DOI: 10.1002/er.8059
- [20] Falcao D.S., Pinto A.M.F.R. A review on PEM electrolyzer modelling: Guidelines for beginners, *Journal of Cleaner Production*, 261 (2020) 121184. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121184
- [21] López-Fernández E., Sacedón C.G., Gil-Rostra J., Yubero F., González-Elise A.R., De Lucas-Consuegra A. Recent advances in alkaline exchange membrane water electrolysis and electrode manufacturing, *Molecules*, 26 (21) (2021) 6326. DOI: 10.3390/molecules26216326

- [22] Hauch A., Küngas R., Blennow P., Hansen A.B., Hansen J.B., Mathiesen B.V., Mogensen M.B. Recent advances in solid oxide cell technology for electrolysis, *Science*, 370 (6513) (2020) 6118. DOI: 10.1126/science.aba6118
- [23] Kebede A.A., Kalogiannis T., Van Mierlo J., Berecibar M. A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration, *Renewable and Sustainable Energy Review*, 159 (2022) 112213. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112213
- [24] Bazdar E., Sameti M., Nasiri F., Haghighat F. Compressed air energy storage in integrated energy systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167 (2022) 112701. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112701
- [25] International Renewable Energy Agency (IRENA). Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal. Abu Dhabi: IRENA, 2022.
- [26] Budt M., Wolf D., Span R., Yan J. A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments, *Applied Energy*, 170 (2016) 250–268. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.02.108

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПАСЕКА Василий Анатольевич — аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: paseka.va@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1875-4253>

КОРОВКИН Николай Владимирович — зав. кафедрой, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1173-8727>

REFERENCES

- [1] B. Sahoo, D.K. Behera, D. Rahut, Decarbonization: examining the role of environmental innovation versus renewable energy use, *Environmental Science and Pollution Research*, 29 (2022) 48704–48719. DOI: 10.1007/s11356-022-18686-1
- [2] International Energy Agency, *Renewables 2023*, (2024). Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023> (дата обращения: 30.06.2025)
- [3] Y. Lv, R. Qin, H. Sun, Z. Guo, F. Fang, Y. Niu, Research on energy storage allocation strategy considering smoothing the fluctuation of renewable energy, *Frontiers in Energy Research*, 11 (2023). DOI: 10.3389/fenrg.2023.1094970
- [4] T. Jiang, D. Shen, Z. Zhang, H. Liu, G. Zhao, Y. Wang, S. Tan, R. Luo, W. Chen, Battery technologies for grid-scale energy storage, *Nature Reviews Clean Technology*, 1 (2025) 474–492. DOI: 10.1038/s44359-025-00067-9
- [5] H. Ersoy, M. Baumann, L. Barelli, A. Ottaviano, L. Trombetti, M. Weil, S. Passerini, Hybrid energy storage and hydrogen supply based on aluminum — a multiservice case for electric mobility and energy storage services, *Advanced Materials Technologies*, 7 (8) (2022) 2101400. DOI: 10.1002/admt.202101400
- [6] A.S. Martyanov, A.A. Terekhin, D. Ismagilov, Yu. Yang, A.A. Kovalyov, G.N. Ryavkin, A.A. Miroshnichenko, V.V. Kichatov, Theoretical and experimental research on wind power hydrogen storage energy system. *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 25–27 (2021) 72–89. DOI: 10.15518/isjaee.2021.09.072-089

- [7] **B.E. Lebrouhi, J.J. Djoupo, B. Lamrani, K. Benabdelaziz, T. Kousksou**, Global hydrogen development – A technological and geopolitical overview, *International Journal of Hydrogen Energy*, 47 (11) (2022) 7016–7048. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.12.076
- [8] **A. Alzahrani, S.K. Ramu, G. Devarajan, I. Vairavasundaram, S. Vairavasundaram**, A Review on hydrogen-based hybrid microgrid system: Topologies for hydrogen energy storage, integration, and energy management with solar and wind energy, *Energies*, 15 (21) (2022) 7979. DOI: 10.3390/en15217979
- [9] **S.P. Popov, V.A. Shakirov, A.V. Kolosnitsyn, D.V. Maksakova, O.A. Baldynov**, Technical and economic model of an autonomous complex for production of «green» hydrogen and its testing on the example of Mongolia and Japan, *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 333 (11) (2022) 124–139. DOI: 10.18799/24131830/2022/11/3773
- [10] **V. Karasevich, Yu. Vasiliev, V. Negrimovsky**, Prospects of autonomic energy supply of isolated areas in Russian Arctic regions using hydrogen technologies, *Energeticheskaya politika [Energy Policy]*, 188 (9) (2023) 62–69. DOI: 10.46920/2409-5516_2023_9188_62
- [11] **A. Abdollahipour, H. Sayyaadi**, Optimal design of a hybrid power generation system based on integrating PEM fuel cell and PEM electrolyzer as a moderator for micro-renewable energy systems, *Energy*, 260 (2022) 124944. DOI: 10.1016/j.energy.2022.124944
- [12] **A. Mohammed, A.M. Ghaithan, A. Al-Hanbali, A.M. Attia**, A multi-objective optimization model based on mixed integer linear programming for sizing a hybrid PV-hydrogen storage system, *International Journal of Hydrogen Energy*, 48 (26) (2023) 9748–9761. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.12.060
- [13] **V. Pignataro, A. Liponi, E. Bargiacchi, L. Ferrari**, Dynamic model of a power-to-gas system: Role of hydrogen storage and management strategies, *Renewable Energy*, 230 (2024) 120789. DOI: 10.1016/j.renene.2024.120789
- [14] **X. Xie, M. Chen, M. Hu, B. Wang, R. Yu, T. Liu**, Recent advances in magnesium-based hydrogen storage materials with multiple catalysts, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (21) (2019) 10694–10712. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.02.237
- [15] **H.A. Issa, S.P. Murovskiy, N.V. Shakhova, E.V. Guseva, V.V. Kuvshinov**, Combined energy system using photoelectric converters and fuel cells, *Power plants and technologies*, 10 (3) (2024) 56–62.
- [16] **A. Naquash, N. Agarwal, M. Lee**, A review on liquid hydrogen storage: Current status, challenges and future directions, *Sustainability*, 16 (2024) 8270. DOI: 10.3390/su16188270
- [17] **K. Pillai, S. Sundaram**, Optimization and feasibility analysis of hybrid distributed generator based system with a comparison of battery and hydrogen energy storage for residential electrification, *Energy Storage*, 6 (8) (2024) e70075. DOI: 10.1002/est2.70075
- [18] **F.A. Sarwar, I. Hernando-Gil, I. Vechiu**, Review of energy management systems and optimization methods for hydrogen-based hybrid building microgrids, *Energy Conversion and Economics*, 5 (4) (2024) 259–279. DOI: 10.1049/enc2.12126
- [19] **N. Sifakis, E. Vichos, A. Smaragdakis, E. Zoulias, T. Tsoutsos**, Introducing the cold-ironing technique and a hydrogen-based hybrid renewable energy system into ports, *International Journal of Energy Research*, 46 (2022) 20303–20323. DOI: 10.1002/er.8059
- [20] **D.S. Falcao, A.M.F.R. Pinto**, A review on PEM electrolyzer modelling: Guidelines for beginners, *Journal of Cleaner Production*, 261 (2020) 121184. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121184
- [21] **E. López-Fernández, C.G. Sacedón, J. Gil-Rostra, F. Yubero, A.R. González-Elipe, A. De Lucas-Consegra**, Recent advances in alkaline exchange membrane water electrolysis and electrode manufacturing, *Molecules*, 26 (21) (2021) 6326. DOI: 10.3390/molecules26216326
- [22] **A. Hauch, R. Küngas, P. Blennow, A.B. Hansen, J.B. Hansen, B.V. Mathiesen, M.B. Mogensen**, Recent advances in solid oxide cell technology for electrolysis, *Science*, 370 (6513) (2020) 6118. DOI: 10.1126/science.aba6118
- [23] **A.A. Kebede, T. Kalogiannis, J. Van Mierlo, J. Bercibar**, A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration, *Renewable and Sustainable Energy Review*, 159 (2022) 112213. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112213

[24] **E. Bazdar, M. Sameti, F. Nasiri, F. Haghighat**, Compressed air energy storage in integrated energy systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167 (2022) 112701. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112701

[25] International Renewable Energy Agency (IRENA). *Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal*. Abu Dhabi: IRENA, 2022.

[26] **M. Budt, D. Wolf, R. Span, J. Yan**, A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments, *Applied Energy*, 170 (2016) 250–268. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.02.108

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Vasiliy A. PASEKA – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.

E-mail: paseka.va@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1875-4253>

Nikolay V. KOROVKIN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.

E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1173-8727>

Поступила: 01.07.2025; Одобрена: 25.07.2025; Принята: 29.07.2025.

Submitted: 01.07.2025; Approved: 25.07.2025; Accepted: 29.07.2025.