

А. А. Шевченко, канд. техн. наук Л. Р. Козак, канд. техн. наук Н. Н. Зипунников, А. Л. Котенко

РАЗРАБОТКА АВТОНОМНЫХ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С ВОДОРОДНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

Проанализированы альтернативные источники энергии в Украине. Рассмотрены проекты с применением водородных технологий, направленных на привлечение энергии солнца в расположенную в зонах с высоким потенциалом солнечной радиации инфраструктуру энерготехнологических комплексов, в частности для заправки автомобильного транспорта. При эксплуатации автономных заправочных станций, использующих в качестве источника энергии солнечную радиацию, весьма вероятно возникновение нештатных ситуаций, обусловленных прекращением энергоснабжения вследствие пасмурной погоды либо аварийным выходом из строя отдельных элементов системы. В данном случае требуется обеспечить ее вывод из эксплуатации без потери технологических возможностей (работоспособности). С этой целью необходимо предусмотреть включение в технологическую схему энерготехнологического комплекса дополнительного элемента, обеспечивающего работу блока в течение заданного времени, определяемого регламентом его эксплуатации. В качестве такого элемента предложена буферная система на основе водородного накопителя энергии. Современный уровень развития водородных технологий, которые реализуются в электрохимических установках, разработанных в Институте проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного Национальной академии наук Украины, позволяет производить и накапливать водород под высоким давлением, что исключает использование компрессорной техники.

Ключевые слова: альтернативные источники энергии, водород, энергия солнца, водородный генератор.

Проаналізовано альтернативні джерела енергії в Україні. Розглянуто проекти із застосуванням водневих технологій, спрямованих на залучення енергії сонця у розташовану в зонах з високим потенціалом сонячної радіації інфраструктуру енерготехнологічних комплексів, зокрема для заправки автомобільного транспорту. Під час експлуатації автономних водневих заправних станцій, що використовують як джерело енергії сонячну радіацію, цілком імовірно виникнення нештатних ситуацій, зумовлених припиненням енергопостачання внаслідок похмурої погоди або аварійним виходом з ладу окремих елементів системи. У цьому випадку потрібно забезпечити виведення її з експлуатації без втрати технологічних можливостей (працездатності). Для цього необхідно передбачити включення в технологічну схему енерготехнологічного комплексу додаткового елемента, що забезпечує роботу блока протягом заданого часу, який визначено регламентом його експлуатації. Таким елементом може виступати буферна система на основі водневого накопичувача енергії. Сучасний рівень розвитку водневих технологій, що реалізуються в електрохімічних установках, розроблених в Інституті проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України, дозволяє виробляти і накопичувати водень під високим тиском, що виключає використання компресорної техніки.

Ключові слова: альтернативні джерела енергії, водень, енергія сонця, водневий генератор.

The article analyzes the energy potential of alternative sources of Ukraine. The projects using hydrogen technologies aimed at attracting solar energy to the infrastructure of energy technological complexes, in particular water desalination systems and for refueling automobile vehicles located in areas with high solar radiation potential, are considered. During the operation of water desalination plants using a solar power station as an energy source, contingencies are very likely to arise due to either a power outage (due to cloudy weather) or an emergency failure of individual elements of the system. In this case, it is required to ensure its removal from service without loss of technological capabilities (operability). For this purpose, it is necessary to provide for the inclusion in the technological scheme of the energy technological complex of an additional element that ensures operation of the unit for a given time, determined by the regulations for its operation. As such an element, a buffer system based on a hydrogen energy storage device is proposed. The current level of hydrogen technologies that are implemented in electrochemical plants developed at the Institute of Mechanical Engineering named after A. N. Podgorny of the National Academy of Sciences of Ukraine allows producing and accumulating the hydrogen under high pressure, which eliminates the use of compressor technology.

Key words: alternative energy sources, hydrogen, solar energy, hydrogen generator.

Введение

Для расширения масштабов использования возобновляемых видов энергии необходимы совершенствование процессов преобразования энергии и повышение технико-экономических характеристик соответствующих энерготехнологических систем. Одним из основных путей решения этой проблемы является повышение эффективности рабочих процессов во всех звеньях системы как на стадии генерации энергии, так и при ее аккумулировании для обеспечения бесперебойного энергоснабжения технологических объектов. Украина обладает значительным потенциалом возобновляемых источников энергии, но на сегодня доля их использования в энергобалансе страны незначительна [1].

Учитывая ежегодную тенденцию к снижению стоимости использования альтернативной энергетики, благодаря совершенствованию технологических схем ее преобразования можно дать положительный прогноз на значительное повышение вклада возобновляемой энергии в энергетическую независимость и безопасность Украины [2].

Цель статьи

Для решения энергоэкологических вопросов Украины целесообразно повысить долю использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) путем создания автономных энерготехнологических комплексов (ЭТК) на базе инновационных электрохимических технологий и возобновляемых источников энергии. Предусмотрено включение в схему ЭТК дополнительных элементов, обеспечивающих его работу в течение заданного времени, определяемого режимом эксплуатации. В качестве такого элемента предложена буферная система накопления водорода, предназначенная для бесперебойного энергоснабжения как при работе комплекса в нестационарных режимах, так и в случае аварийной остановки.

Потенциал возобновляемых источников энергии Украины

Геотермальная энергия. В Украине годичный теплоэнергетический потенциал составляет более 400 млн Гкал, а эксплуатационные ресурсы термальных вод по запасам тепла эквивалентны использованию около 10-12 млн т.у.т./год.

Гидроэнергетика. Выработка гидроэнергии в Украине достигла 12,2 ТВт·ч. Гидроэнергетика дает около 10 % электричества в Украине.

Энергия использования биомассы. Экономически целесообразный энергетический потенциал биомассы в стране составляет порядка 20-25 млн т.у.т./год.

Солнечная энергетика, пожалуй, самая перспективная область для развития в Украине. Этот источник относится к возобновляемым ресурсам, и уделяемое ему внимание во всем мире заставляет рассмотреть его возможности отдельно. Потенциал использования солнечной энергии в Украине является достаточно высоким для широкого внедрения тепло- и фотоэлектрического оборудования.

Для реализации этого направления следует решить ряд технических вопросов, связанных с нестабильностью энергопоступления и относительно малой плотностью солнечного потока: за пределами атмосферы $1,4 \text{ Вт/м}^2$, на поверхности Земли в ясный день около 1 Вт/м^2 .

Суммарное среднегодовое количество солнечной энергии, поступающей на 1 км^2 территории Украины, составляет почти 1070 кВт·ч в северной части страны и 1400 кВт·ч в южных областях (рис. 1). Эти показатели солнечного излучения создают трудности в разработке эффективных ЭТК, поскольку требуется большая площадь покрытия фотопреобразующими элементами с последующим аккумулированием энергии.

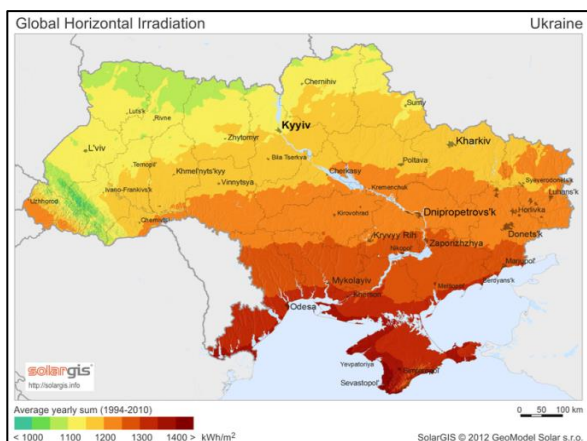


Рис. 1. Технический потенциал гелиоэнергетических ресурсов Украины для выработки электроэнергии

Ветровая энергетика тоже перспективна, но срок ее окупаемости больше. В Украине климат умеренный, потоки ветра отмечаются на всей территории.

Наиболее подходящими для внедрения ветроэнергетики представляются Харьковская, Луганская, Донецкая, Днепропетровская и Запорожская области (рис. 2).

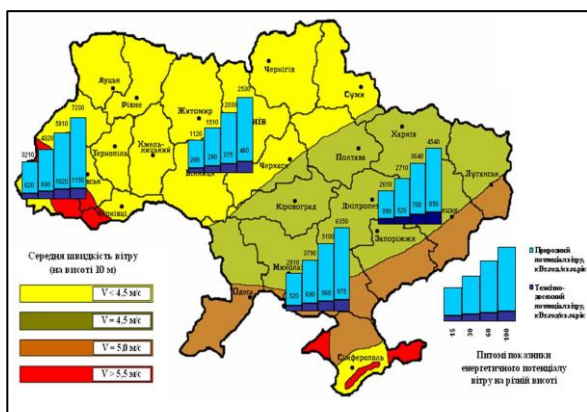


Рис. 2. Потенциал ветроэнергетических ресурсов Украины

В 2019 году в Украине введено 2,5 тыс. МВт мощностей на возобновляемой энергии. До 2020 года Украина должна производить не менее 11 % энергии из возобновляемых источников, а к 2035 году – 25 % от всей произведенной энергии, что составит конкуренцию атомной энергетике [3].

Так как мировая энергетическая отрасль в настоящее время уверенно движется в сторону экологически чистых, возобновляемых источников энергии (ветер, солнце), которые требуют аккумулирования больших объемов энергии для сглаживания не-

равномерности и цикличности ее поступления извне, альтернативы водороду как самому энергоемкому и экологически чистому энергоносителю практически не существует.

Сравнительно низкий (до 50%) КПД преобразования избыточной энергии в водород и водорода в электричество не является сдерживающим фактором, так как используется именно избыточная энергия, которая без аккумулирования просто пропадает.

В настоящее время в промышленных масштабах водород производят в основном двумя методами:

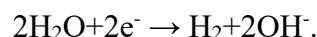
- каталитическим разложением природного газа при высокой температуре;
- электролизом воды.

При каталитическом разложении природного газа происходит выброс CO, CO₂ и токсичных соединений азота. Таким образом электролиз воды становится единственным экологически чистым методом получения водорода.

Основные принципы работы щелочных электролизеров с жидким электролитом

Основными процессами на электродах электролиза воды в щелочных растворах являются: на катоде – восстановление воды с выделением водорода, на аноде – окисление воды с выделением кислорода.

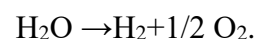
Реакция на катоде



Реакция на аноде



Суммарная реакция



Теоретическое напряжение разложения воды

$$E^0 = - \Delta_r G^0 / 2F = 1,229 \text{ В.}$$

Термодинамическое напряжение разложения воды

$$E_{\text{тн}}^0 = - \Delta_r H^0 / 2F = 1,48 \text{ В.}$$

Для разделения водорода и кислорода между катодом и анодом устанавливаются

ионообменные мембраны, которые имеют невысокую электропроводность и герметично разделяют полости водорода и кислорода, обеспечивая высокую чистоту генерируемых газов порядка 99,98 % и выше (рис. 3).

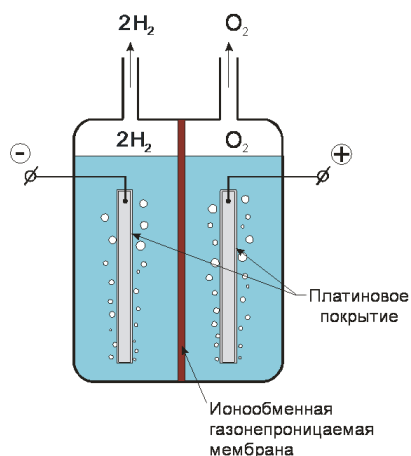


Рис. 3. Схема щелочного электролизера с жидким электролитом

Мембраны в щелочных электролизерах решают важную и необходимую задачу разделения газов, одновременно являясь основным источником недостатков традиционной технологии генерации водорода и кислорода:

1. Увеличивается электрическое сопротивление между электродами.

2. Герметично разделены полости водорода и кислорода, а поскольку водорода по объему генерируется в два раза больше, чем кислорода ($2H_2$ и O_2), давление по обе стороны мембран разное, что приводит к большим силовым нагрузкам на их поверхность и ограничивает допустимое рабочее давление.

3. Для компенсации потерь удельной производительности мембранных электролизеров на электроды наносится каталитическое платиновое покрытие, которое резко повышает стоимость электродов электролизеров [14-17].

4. Низкое давление генерируемых газов (как правило, менее 1 МПа) требует применения компрессорного оборудования для их подачи в газовые хранилища.

5. Низкий КПД компрессоров для водорода (15-45 %) и кислорода (13-17 %) при-

водит к дополнительному увеличению (на 10-15 %) удельных затрат энергии при производстве и хранении газов.

Ученые и специалисты Института проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного Национальной академии наук Украины (ИПМаш НАН Украины) с участием специалистов ГП «КБ «Южное» разработали и отработали на лабораторных образцах инновационную технологию генерации водорода и кислорода при высоком давлении без использования разделительных мембран [8-13].

Процесс генерации газов в электролизере высокого давления (ЭВД) состоит из двух полуциклов периодически чередующихся окислительных и восстановительных реакций активной массы газопоглощающего электрода и поочередного выделения водорода и кислорода на газогенерирующем электроде (рис. 4).

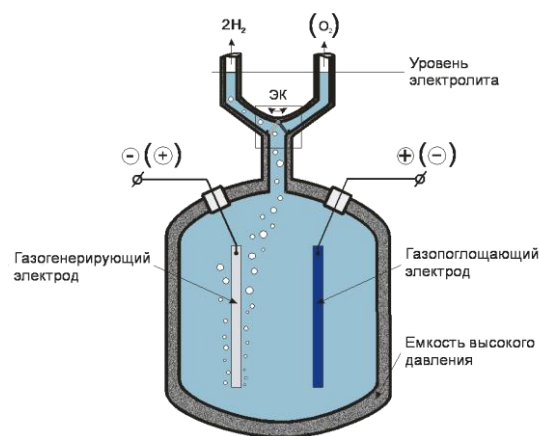


Рис. 4. Принципиальная схема безмембранного электролизера высокого давления

Процесс генерации водорода начинается с подачи на пассивный (газогенерирующий) электрод отрицательного потенциала. На этом этапе активный (газопоглощающий) электрод выступает в качестве анода. Реакция разложения воды происходит с одновременным выделением H_2 и O_2 , но при этом водород выделяется на газогенерирующем электроде в газообразном виде, а кислород химически связывается газопоглощающим электродом (накапливается в виде химического соединения). Питание электроэнергией электролизной ячейки

синхронизировано с электромеханическим переключателем потока электроклапана, в результате чего H_2 выделяется и заполняет только водородную магистраль, не смешиваясь с O_2 . При достижении порогового напряжения осуществляется переключение полярности с одновременным включением электромеханического переключателя газожидкостного потока электроклапана, в результате чего пассивный электрод становится анодом, а активный электрод – катодом. Таким образом, в электролите всегда присутствует только один газ – либо водород, либо кислород. Необходимость установки ионообменных мембран отсутствует, а без разделительных мембран процесс электролиза может проходить при любом давлении, ограниченном лишь прочностью сосудов электролизера и емкостей для хранения газов.

Промышленные образцы и перспективные разработки электрохимических генераторов водорода

Технологии получения водорода основаны на процессах разложения воды путем электролиза и широко применяются в различных отраслях современной техники. Основным недостатком электрохимического метода получения водорода является его большая энергоёмкость. Поэтому для водородной энергетики актуальной проблемой является разработка электрохимических технологий генерации водорода под высоким давлением с минимальными затратами электроэнергии.

В промышленности широко используются электролизеры с жидким щелочным электролитом, обеспечивающие генерацию газов с давлением 0,05-1,6 МПа в диапазоне температур от 333 до 353 К и при плотности тока 1200-2500 А/м². При этом энергозатраты (в зависимости от температуры процесса, давления, качества электродов, конструкции электролизера и ряда других факторов) изменяются в пределах от 4,3 до 5,2 кВт·ч/м³ водорода.

В табл. 1 приведены технические характеристики используемых и перспективных электролизеров.

Таблица 1

Промышленные образцы и перспективные разработки электролизного оборудования

Модель	Тип электролизера	Производительность		Давление H_2 (изб.), МПа	Расходы электроэнергии		Чистота H_2 , %
		нм ³ /ч	кг/ч		кВт·ч/м ³	кВт·ч/кг	
Norsk HPE 10	Биполярный щелочной	10	0,9	1,6	4,8	53,4	99,8
ФБ-250М	Биполярный щелочной	260	23,4	$1,0 \cdot 10^{-3}$	5,3	58,8	99,5
TELEDYNE TITAN™ EC-500	Биполярный щелочной	28	2,5	0,4-0,7	5,6	62,3	99,9998
СЭУ-4М	Биполярный щелочной	4,0	0,36	1,0	5,2	58,3	99,0
HySTAT-A-1000Q-40-10	Биполярный щелочной	40	3,6	1,0	4,8	53,3	99,98
GHW	Биполярный щелочной	110	9,9	3,0	4,5	55,5	99,7
Proton Energy Systems HOGEN H Series	РЕМ	6	0,5	1,5	6,3	70,1	99,999
РПЦ «Курчатовский институт»	РЕМ	10	0,9	5,0	4,3	47,7	99,98
Treadwell Corporation	РЕМ	10,2	0,92	7,5	–	–	99,999
ИПмаш НАНУ (ЕНР)	Монополярный щелочной	1,0	0,09	15,0-70,0	3,9-4,0	45,2	99,98

Использование электролизера высокого давления в составе энергетического комплекса

Все ЭТК на основе возобновляемых источников энергии можно разделить на два типа: автономные и сетевые (соединенные с централизованной электрической сетью) [2-4]. ЭТК второго типа отдают излишки энергии в сеть. Типовая автономная система состоит из агрегатов, использующих возобновляемые источники (ветер, солнце) для производства электроэнергии, аккумуляторных батарей (АКБ) в качестве буферного накопителя электроэнергии, контроллера разряда-заряда аккумуляторов, соединительных кабелей.

Приоритетным направлением в разработке автономного ЭТК следует считать замену аккумуляторных батарей на буферное накопление водорода, полученного электролизным способом.

Для производства электроэнергии в периоды снижения интенсивности энергии ветра и солнца водород предлагается либо сжигать в двигателе внутреннего сгорания, либо использовать для этой цели топливные элементы. Последнему подходу отдается предпочтение из-за более высокого КПД энергии водорода, бесшумности, компактности и удобства эксплуатации электрохимических энергоустановок [5-6].

Во время исследований сформированы принципы научно-технического развития электрохимических водородных систем и предложены пути оптимизации их работы на нестационарных режимах, характерных для реальных условий эксплуатации энерготехнологических комплексов на базе ВИЭ [7-9].

Предлагаемая технология производства водорода высокого давления [10, 12-16] состоит из двух полуциклов периодически чередующихся окислительных и восстановительных реакций с участием активной массы газопоглощающего электрода. Управление электрохимическими процессами осуществляется на основании данных об изменении установленных эксперименталь-

ным путем и используемых в системе автоматического контроля параметров вольт-амперных характеристик процесса, обеспечивающего подачу газожидкостной смеси в соответствующую магистраль (рис. 5).

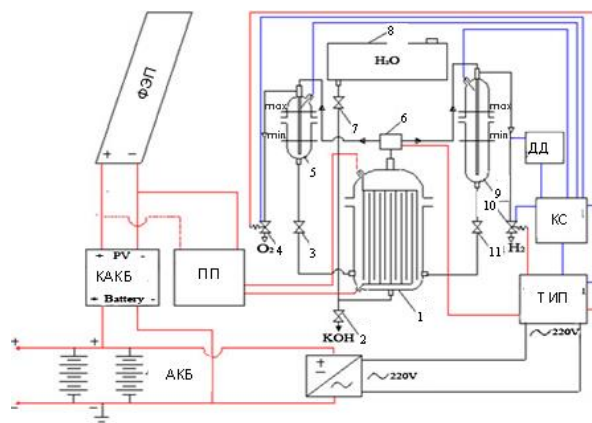


Рис. 5. Принципиальная схема

энерготехнологического комплекса:

1 – электрохимическая ячейка; 2 – кран слива электролита КОИ с гидравлической системы электролизера; 3, 11 – краны обратной связи кислородного и водородного сепараторов; 4 – кран с электромеханическим приводом для автоматического сброса кислорода в систему хранения; 5 – кислородный сепаратор; 6 – электромеханический переключатель газожидкостного потока; 7 – кран заполнения гидравлической системы электролизера электролитом; 8 – технологический бак хранения воды; 9 – водородный сепаратор; 10 – кран с электромеханическим приводом для автоматического сброса водорода в систему хранения; АКБ – аккумуляторная батарея; КАКБ – контроллер заряда-разряда аккумуляторной батареи; ДД – контроллер датчиков давления; ТИП – технологический источник питания; КС – контроллер системы; ПП – переключатель полярности; ФЭП – фотоэлектрический преобразователь

Электрохимическая реакция разложения воды протекает с ростом напряжения на катодно-анодной паре в процессе генерации газов. При достижении порогового напряжения 1,2 В осуществляются переключение полярности с одновременным включением электромеханического переключателя газожидкостного потока, в результате чего пассивный электрод становится анодом, а активный – катодом.

На пассивном электроде выделяется газообразный кислород, а на катоде происходит восстановление водородом активной массы газопоглощающего электрода (рис. 6).

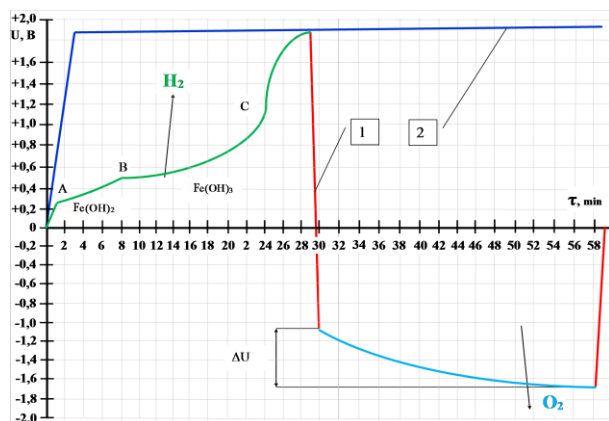
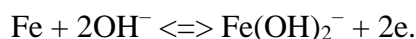


Рис. 6. Циклограмма изменения напряжения во время выделения водорода и кислорода при электролизе:

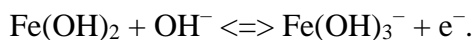
1 – циклограмма работы ЭВД при плотности тока $J = 200 \text{ A/m}^2$; 2 – изменение напряжения стандартного электролизера; А-В – рабочая область полуцикла; В-С – область работы с дополнительными энергозатратами; ΔU – перенапряжение при восстановлении активной массы

При достижении порогового значения напряжения 1,6 В происходит переключение полярности электродов и цикл повторяется.

Использование в качестве газопоглощающего электрода материала с переменной валентностью (например, губчатого железа), химически связывающего кислород (рис. 6, участок А-В), соответствует реакции



При длительной работе активной массы электрода происходит более глубокая проработка электродной массы:



Область циклограммы изменения электродного потенциала при электрохимическом получении водорода и кислорода на полуцикле выделения H_2 (рис. 6, участок В-С) соответствует переходу Fe(II) в Fe(III), а полуцикл выделения O_2 – электрохимическому восстановлению гидроксидов железа.

Для снижения затрат электроэнергии, используемой для реализации процесса генерации водорода, необходима оптимизация режимов работы электрохимической ячейки.

Первичная очистка электролита от паров происходит в сепараторе, который выполняет функцию разделения газожидкостного потока на составные компоненты – газ и жидкость. Экспериментальные характеристики производительности ЭВД представлены на рис. 7.

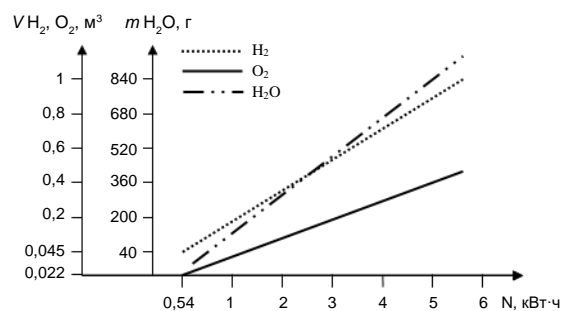


Рис. 7. Экспериментальные характеристики электролизера

С целью решения энергоэкологических проблем Украины предлагается расширить использование возобновляемых видов энергии путем создания автономных ЭТК (рис. 8).

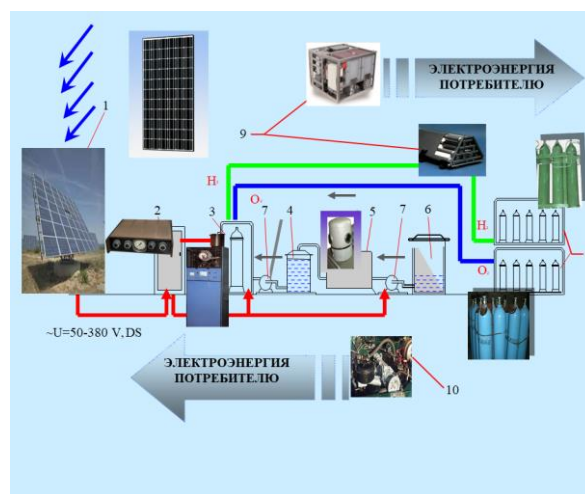


Рис. 8. Принципиальная схема автономного солнечно-водородного ЭТК для заправки автотранспорта: 1 – ФЭП; 2 – система электропитания и управления; 3 – электролизер высокого давления; 4 – бак воды; 5 – опреснительный блок; 6 – бак исходной воды; 7 – насос; 8 – баллоны для хранения газов; 9 – металлгидридные модули для длительного хранения и сжатия водорода, топливные элементы; 10 – двигатели внутреннего сгорания

Результаты экспериментальных исследований относительно зависимости затрат электроэнергии при производстве H_2 и O_2 приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные характеристики ЭТК с водородным накопителем энергии при различных режимах эксплуатации

Основные характеристики ЭТК	Режимы работы генератора				
	20%	40%	60%	80%	100%
Мощность, кВт·ч	40	80	120	160	200
Расход дистиллята, кг	8,2	16,5	24,7	32,9	41,2
H ₂ , м ³	9,7	19,5	29,2	39,0	48,8
O ₂ , м ³	4,8	9,76	14,3	19,5	24,9

Топливозаправочные станции, которые построены по разработанной схеме, могут составить конкуренцию зарубежным аналогам, где водород получают из бытового газа [18-20].

Применение в составе топливозаправочного гелиоэнергетического комплекса оригинальной электролизной технологии по сравнению с традиционными электролизерами обеспечивает высокую эффективность отбора мощности, надежность и безопасность эксплуатации.

Важной составляющей обеспечения надежной и эффективной работы энерготехнологического комплекса является синхронизация работы ФЭП и системы генерации газов. Эти данные о конструктивных решениях электролизной техники и особенностях ее эксплуатации в технологических схемах позволили разработать оригинальный алгоритм управления основными элементами и создать техническую базу для его реализации.

Особенности подключения солнечных батарей в составе ЭТК

Поскольку работа энергоустановки характеризуется непостоянством поступления энергии, выбор основных проектных параметров комплекса (производительность электрохимического генератора водорода и кислорода высокого давления, параметры хранения водорода) определяется с учетом региона и расположения энергоустановки.

Для технического решения этого вопроса рассмотрены схемы с параллельным и непосредственным подключением ЭВД в качестве буферного накопителя энергии.

Основными недостатками схемы ЭТК с последовательным подключением ЭВД являются снижение КПД преобразования энергии и снижение надежности системы в целом за счет наличия промежуточных элементов энерготехнологической схемы (рис. 9, а). В схеме ЭТК с непосредственным подключением отсутствуют промежуточные элементы. ЭВД напрямую подключен к ФЭП (рис. 9, б), что существенно повышает КПД отбора мощности, генерируемой ФЭП, и обеспечивает ее передачу без потерь на ЭВД с последующим буферным накоплением водорода в качестве вторичного энергоносителя.

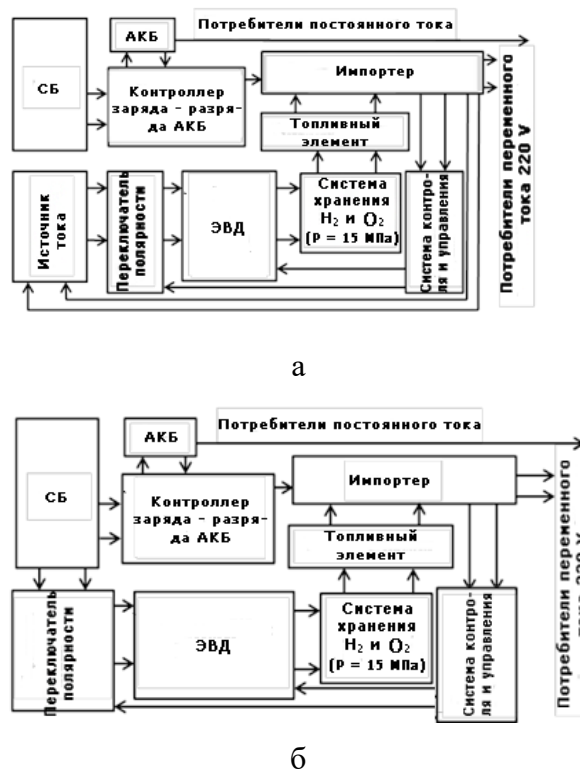


Рис. 9. Схемы автономных ЭТК с использованием генераторов водорода в качестве буферного накопителя энергии:

а – схема ЭТК с последовательным подключением ЭВД в качестве буферного накопителя энергии; б – схема ЭТК с непосредственным подключением ЭВД водорода высокого давления в качестве буферного накопителя энергии

Гелиоэнергетическая установка предназначена для преобразования энергии солнца в экологически чистый энергоноситель – водород, который структурно вписан в схему ЭТК и обеспечивает решение проблемы бесперебойной подачи электрической энергии потребителю.

Выводы

Исследованы особенности создания солнечных водородных заправочных станций на территории Украины для обеспечения автотранспорта экологически чистым топливом – водородом. Рассмотрено включение в технологическую схему ЭТК буферной системы накопления водорода для обеспечения бесперебойного энергоснабжения при работе комплекса как в нестационарных режимах, так и в случае аварийной остановки.

Использование в составе ЭТК инновационной технологии генерации водорода, основанной на применении безмембранного ЭВД, обеспечивает следующие преимущества:

- высокое давление генерируемых газов, ограниченное практически только прочностью элементов конструкции ЭВД;

- исключение из состава ЭТК компрессорного оборудования, которое резко усложняет эксплуатацию комплекса, увеличивает потребление энергии и зачастую существенно превышает стоимость электролизеров;

- снижение на 10-15 % затрат энергии на генерацию газов по сравнению с существующими электролизными системами (удельное энергопотребление составляет 3,8-4,1 кВт·ч) и дополнительное снижение затрат на 10-15 % за счет отсутствия компримирования газов для их хранения;

- повышение надежности и безопасности эксплуатации ЭТК, которое обеспечивается отсутствием в ЭВД разделительных мембран, а также реализацией оптимальных алгоритмов управления технологическими процессами;

- в конструкции ЭВД не применяются редкоземельные металлы и металлы платиновой группы, за счет чего существенно

снижается его стоимость и упрощается процесс производства.

Список использованной литературы

1. Сиволапов В. Потенціал відновлюваних джерел енергії в Україні. *Agroexpert*. 2016. № 12 (101). С. 74–77.

2. Züttel A., Remhof A., Borgschulte A., Friedrichs O. Hydrogen: the future energy carrier. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2010. № 368(1923). P. 3329–3342.

3. Возобновляемая энергетика. URL: <https://nv.ua/tags/vozobnovljajemaja-enerhetika.html> (дата обращения: 27.01.2020).

4. Sherif S. A., Barbir F., Veziroglu T. N. Wind energy and the hydrogen economy-review of the technology. *Solar energy*. 2005. № 78(5). P. 647–660.

5. Schlapbach L. Technology: Hydrogen-fuelled vehicles. *Nature*. 2009. № 460(7257). P. 809.

6. Shevchenko A. A., Zipunnikov M. M., Kotenko A. L., Vorobiova I. O., Semykin V. M. Study of the Influence of Operating Conditions on High Pressure Electrolyzer Efficiency. *Journal of Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 22, № 4. P. 53–60.

DOI: <https://doi.org/10.15407/pmach2019.04.053>.

7. Clarke R. E., Giddey S., Ciacchi F. T., Badwal S. P. S., Paul B., Andrews J. Direct coupling of an electrolyser to a solar PV system for generating hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009. № 34(6). P. 2531–2542.

8. Kunsch C., Puleston P. F., Mayosky M. A., Riera J. Sliding mode strategy for PEM fuel cells stacks breathing control using a super-twisting algorithm. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2009. № 17(1). P. 167–174.

9. Mazloomi K., Gomes C. Hydrogen as an energy carrier: Prospects and challenges. *Renew. Sustain. Energy Rev*. 2012. № 16. P. 3024–3033.

10. Sharma S., Ghoshal S. K. Hydrogen the future transportation fuel: From production to applications. *Renew. Sustain. Energy Rev*. 2015. № 43. P. 1151–1158.

11. Пристрій для одержання водню високого тиску: пат. 103681 Україна: МПК6 С 25В 1/12 / В. В. Соловей, А. А. Шевченко, А. Л. Котенко, О. О. Макаров (Україна). № 2011 15332; заявл. 26.12.2011; опубл. 10.07.2013, Бюл. № 21. 4 с.
12. Шевченко А. А. Использование ЭЛАЭЛов в автономных энергоустановках, характеризующихся неравномерностью энергопоступления. *Авиационно-космическая техника и технология*: сб. науч. тр. 1999. Вып. 13. С. 111–116.
13. Соловей В. В., Жиров А. С., Шевченко А. А. Влияние режимных факторов на эффективность электролизера высокого давления. *Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования*: сб. науч. тр. 2003. С. 250–254.
14. Solovey V., Kozak L., Shevchenko A., Zipunnikov M., Campbell R., Seamon F. Hydrogen technology of energy storage making use of windpower potential. *Problemy Mashinostroyeniya. Journal of Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 20, № 1. P. 62–68. DOI: <https://doi.org/10.17721/fujcV6I2P73-79>
15. Соловей В. В., Котенко А. Л., Воробьева И. О., Шевченко А. А., Зипунников М. М. Основные принципы работы и алгоритм управления безмембранным электролизером высокого давления. *Проблемы машиностроения*. 2018. Т. 21, №. 4. С. 57–63. DOI: <https://doi.org/10.15407/pmach2018.04.057>
16. Solovey V., Khiem N. T., Zipunnikov M. M., Shevchenko A. A. Improvement of the Membraneless Electrolysis Technology for Hydrogen and Oxygen Generation. *French-Ukrainian Journal of Chemistry*. 2018. Vol. 6, № 2. P. 73–79. DOI: <https://doi.org/10.17721/fujcV6I2P73-79>
17. Solovey V., Zipunnikov N., Shevchenko A., Vorobjova I., Kotenko A. Energy Effective Membrane-less Technology for High Pressure Hydrogen Electro-chemical Generation. *French-Ukrainian Journal of Chemistry*. 2018. Vol. 6, № 1. P.151–156. DOI: <https://doi.org/10.17721/fujcV6I1P151-156>
18. Соловей В. В., Зипунников М. М., Шевченко А. А., Воробйова І. О., Семикін В. М. Безмембранний генератор водню високого тиску. Фундаментальні аспекти відновлювано-водневої енергетики і паливно-комірчаних технологій / за загал. ред. Ю. М. Солоніна. Київ, 2018. С. 99–107.
19. Matsevytyi Yu. M., Chorna N. A., Shevchenko A. A. Development of a Perspective Metal Hydride Energy Accumulation System Based on Fuel Cells for Wind Energetics. *Journal of Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 22, № 4. P. 48–52. DOI: <https://doi.org/10.15407/pmach2019.04.048>
20. Phillips R., Edwards A., Rome B., Jones D. R., Dunnill C. W. Minimising the ohmic resistance of an alkaline electrolysis cell through effective cell design. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2017. № 42. P. 23986–23994.

Статья поступила 11.02.2020