Заправочная станция на возобновляемых источниках энергии для водородного и электрического транспорта

О.Г. Лосев, инженер-исследователь НИЦ «Курчатовский институт», аспирант Национального исследовательского университета «МЭИ»,
И.В. Марусева, инженер-исследователь НИЦ «Курчатовский институт», студентка Национального исследовательского университета «МЭИ»,
А.С. Пушкарёв, инженер-исследователь НИЦ «Курчатовский институт», студент Национального исследовательского университета «МЭИ»,
С.А. Григорьев, начальник отдела НИЦ «Курчатовский институт», профессор Национального исследовательского университета «МЭИ», д.т.н.,
А.С. Григорьев, начальник отдела НИЦ «Курчатовский институт», к.т.н.

Изложена концепция стационарной заправочной станции для водородного и электрического транспорта на основе энергоустановки с водородным накопителем на возобновляемых источниках энергии и электрохимических систем с твердым полимерным электролитом.

Ключевые слова: заправочная станция, возобновляемый источник энергии, электрохимическая система, водородный накопитель, водородный автомобиль, электромобиль.

Современные пилотные проекты по внедрению в эксплуатацию электрических и водородных автомобилей требуют создания соответствующей инфраструктуры станций электрической подзарядки и водородных заправочных станций [1]. При их создании перспективно применение энергоустановок на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и низкотемпературных электрохимических систем с водородными накопителями [2-9].

Рассмотрим концепцию полностью автономной комбинированной заправочной станции на основе ВИЭ для электромобилей и водородного транспорта (рис. 1).

Принцип ее работы заключается в следующем. В период доступности ВИЭ за счет солнечных батарей *1* и ветрогенератора *2* энергоустановка производит электроэнергию, часть которой поступает в электролизную систему *5*, где производится водород, поступающий в систему хранения *6* на основе газовых баллонов или металлогидридных реакторов, а другая часть – на зарядку литий-ионных аккумуляторных батарей *4*, посредством которых осуществляется быстрая зарядка аккумуляторов электромобиля *9* (параметры зарядного тока 125 А/500 В). При отсутствии солнца и ветра водород по мере необходимости поступает в батарею топливных элементов *8*, которые вырабатывают электроэнергию для подзарядки аккумуляторных батарей терминала электрической зарядки автомобилей. Этот же водород используется для заправки водородных транспортных средств *7*.

Поскольку поступление энергии от ВИЭ имеет периодический характер, необходимо ее запасать для использования в период недоступности ВИЭ. В рамках предлагаемой концепции аккумулирование энергии осуществляется посредством накопления и хранения водорода – высокоэффективного экологически безопасного энергоносителя. В данном случае электрическую энергию предлагается преобразовывать в химическую электролизом воды с твердым полимерным электролитом (ТПЭ), являющимся безопасным и эффективным методом производства водорода и кислорода (энергетические затраты составляют около 4 кВт·ч/м^3 водорода [10]). Немаловажно и то, что чистота производимых электролизных газов соответствует чистоте газов, необходимых в дальнейшем для топливных элементов с ТПЭ [11], которые используются на водородных транспортных средствах. Электролиз воды и соответственно хранение водорода предлагается проводить при давлении 5 МПа, что существенно экономит электроэнергию наиболее энергоемкой ступени сжатия водорода (до 3…5 МПа). Это обусловлено энергозатратами на создание давления в электролизере существенно более низкими, чем в традиционных компрессорах [4, 12]. До давления 35 МПа, которое соответствует стандартам хранения газообразного водорода на транспортных средствах, водород

предполагается дожимать с помощью электрохимического [13] или механического компрессоров.

Среди основных преимуществ водородного аккумулирования по сравнению с традиционным можно выделить следующие:

- небольшие потери при хранении;
- сравнительно небольшую площадь, которую занимает аккумулирующая система;
- значительно большее число циклов заряда–разряда.

Для обратного преобразования химической энергии в электрическую используется батарея топливных элементов с ТПЭ. Для наиболее эффективной работы топливных элементов целесообразно применение чистого кислорода в качестве окислителя и, следовательно, накопление и хранение кислорода, получаемого вместе с водородом в процессе электролиза. Однако в качестве окислителя может быть использован и кислород, содержащийся в воздухе. Это позволит отказаться от системы его хранения, но приведет к снижению характеристик батареи топливных элементов. Подобные автономные заправочные станции предлагается размещать, кроме прочего, в курортных и заповедных зонах, где необходимо обеспечивать экологическую безопасность транспортных средств и заправочных станций.

Приведем в качестве примера расчет параметров заправочной станции для о. Коневец, расположенного в экологически чистом районе на Ладожском озере. Уникальность этого острова заключается, прежде всего, в тиши, удаленности от цивилизации и богатом культурном наследии. На острове расположены Коневский Рождество-Богородичный мужской монастырь, ряд жилых объектов, предназначенных для проживания туристов и паломников, а также специальные объекты. На острове нет централизованного электроснабжения, поэтому он является подходящим местом для реализации пилотных проектов автономных энергоустановок, в том числе заправочных станций для альтернативных видов автомобильного транспорта. В расчетах учтены три электромобиля и пять автомобилей на водородном топливе, что соответствует нынешнему автопарку острова, которые необходимо обеспечить топливом.

Национальная лаборатория возобновляемых источников энергии (США) в своих оценках использует среднюю дальность пробега легкового автомобиля, равную 12 тыс. миль/год (19,2 тыс. км/год или 52 км/сут), а потребление водорода – 1 кг на 60 миль (96 км) пробега. Таким образом, одному легковому автомобилю на водородных топливных элементах требуется 200 кг/год водорода, или 0,55 кг/сут.

В расчетах принято, что данный транспорт необходимо заправлять 1 раз/сут, следовательно для заправки пяти автомобилей необходимо 2,75 кг водорода. Нормальный объем 1 кг водорода составляет 11,2 м^3, для выработки которого требуется затратить около 4 кВт·ч электроэнергии. Значит, для выработки 2,75 кг водорода требуется затратить 123,2 кВт·ч электроэнергии.

Энергия, необходимая для зарядки электромобиля, рассчитана на основании данных о серийно выпускающихся электромобилях:

- Ford Ranger – 0,25 кВт·ч/км;
- Toyota RAV4 EV – 0,19 кВт·ч/км;
- Nissan LEAF – 0,21 кВт·ч/км.

В нашем случае можно принять среднее значение расхода электроэнергии – 0,22 кВт·ч. Следовательно при



Рис. 1. Функциональная схема автономной комбинированной заправочной станции на основе ВИЭ для электромобилей и водородного транспорта:
1 – фотоэлектрический преобразователь; *2* – ветрогенератор; *3* – устройство коммутации и стабилизации; *4* – аккумуляторные батареи; *5* – электролизная установка; *6* – емкость для хранения водорода; *7* – водородный заправочный терминал; *8* – установка на основе топливных элементов; *9* – электрический заправочный терминал

пробеге 52 км электромобилю необходимо передать 11,4 кВт·ч, а трем электромобилям – 34,2 кВт·ч.

Таким образом, для заправки требуемого числа электрических и водородных транспортных средств энергоустановка должна вырабатывать 123,2+34,2=157,4 кВт·ч/сут электроэнергии. Необходимая годовая выработка составит примерно 57,5 МВт·ч.

Будем считать, что одновременно электрический заправочный терминал будет заряжать только один электромобиль. Тогда аккумуляторная батарея, посредством которой будет осуществляться зарядка электромобилей, должна обеспечить в течение 20…30 мин параметры тока 125 А/500 В и передать 11,4 кВт·ч электроэнергии. Также следует учесть, что глубокий разряд негативно сказывается на ресурсе работы аккумуляторной батареи, поэтому число аккумуляторов подобрано таким образом, чтобы после зарядки одного электромобиля общая емкость накопленной энергии составляла не менее ¾ от емкости при 100%-ном заряде.

Для определения оптимального состава энергоустановки были использованы данные по солнечной инсоляции за период 1994-2004 гг. [14], а также метеорологические данные за тот же период, взятые с ближайшей метеостанции, расположенной на о. Валаам [15]. Расчеты проводились при помощи математической модели «Чукотка», разработанной сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт». В ходе расчетов сделано допущение о схожести погоды на островах Коневец и Валаам.

В результате расчетов в оптимальный состав генерирующих мощностей вошли солнечные батареи марки RZMP-130-T производства Рязанского завода металлокерамических приборов в количестве 300 шт. (площадь одной фотопанели 1 м^2) и один ветрогенератор ВРТБ-5000 также отечественного производства. Годовая выработка электроэнергии на данном оборудовании составляет 76,6 МВт·ч. В летний период вырабатывается большое количество избыточной электроэнергии (19,1 МВт·ч), которая направляется в электролизер для производства водорода. Далее водород накапливается в системе хранения, а в зимний период используется для выработки недостающего количества электроэнергии (рис. 2). Средний циклический КПД аккумулирующей системы составляет 43 %.

Поскольку ВИЭ характеризуются непостоянным потоком энергии, электрохимические установки необходимо проектировать так, чтобы плотность тока находилась в рабочем интервале, который для систем с ТПЭ составляет 0,5…1,0 А/см^2. Для этого можно разделять установки на несколько модулей и/или использовать модули с коммутируемыми ячейками.

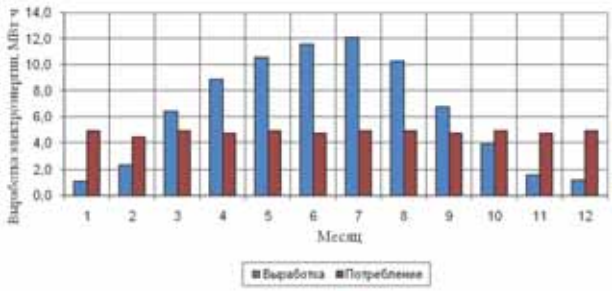


Рис. 2. Диаграмма расчетной ежемесячной выработки и потребления электроэнергии

На основании годового распределения мощности, вырабатываемой фотопанелями и ветрогенератором, определены расчетные рабочие параметры электролизной системы. Потребляемая мощность батареи в расчетном режиме составит 40 кВт. Всего в состав электролизной системы будут входить четыре модуля, каждый из которых рассчитан на номинальное потребление 10 кВт электроэнергии. Напряжение на одном модуле составит U = 36 В. Расчетный режим модуля характеризуется плотностью тока i=1 А/см^2 и напряжением одной электролизной ячейки $U_{яч}$=1,7 В. Число ячеек в одном модуле составит $n=U/U_{яч}=36/1{,}7\approx21$. Сила тока, протекающего в модуле, равна $I=N/U=10000/36=277{,}8$ А, а площадь электродов $S=I/i=277{,}8/1=277{,}8$ см^2.

При зарядке только одного электромобиля расчетный интервал между двумя последовательными зарядками должен составлять не менее 2 ч. Расчетная мощность батареи топливных элементов, которая позволит осуществлять заправку электромобилей во время простоя основных генерирующих мощностей, составит N=11,4 кВт·ч/2 ч=5,7 кВт. В расчетном режиме напряжение батареи топливных элементов составит U=36 В. Напряжение одной ячейки составляет 0,74 В, а плотность тока i=1 А/см^2. Тогда число ячеек в батарее $n=36/0{,}74\approx48$ шт. Сила тока батареи составит $I=N/U=5700/36=158{,}3$ А, а площадь электродов $S=I/i=158{,}3/1=158{,}3$ см^2.

Хранение водорода и кислорода осуществляется различными способами. Можно выделить три группы методов хранения – под давлением, в связанном, а также в жидком состояниях [12]. Большое количество водорода и кислорода предлагается хранить под повышенным давлением (около 5 МПа) в специальных трубах-контейнерах. Такой способ недорог, и резервуары не займут много места. Если среднее напряжение ячейки электролизных модулей $U_{ср}$=1,7 В, то масса водорода составит

$$m=\frac{k\,Q_{эл}}{U_{ср}}\eta_{эл}=\frac{1{,}045\cdot10^{-8}\cdot19{,}1\cdot10^{6}}{1{,}7}\,3600\cdot0{,}85\approx360\ \text{кг},$$

где k – электрохимический эквивалент водорода, кг/Кл; $Q_{эл}$ – количество электроэнергии, выработанное сверх

потребления за год, которое электролизные модули преобразуют в водород (см. рис. 2), МВт·ч; $\eta_{эл}$ – КПД электролизера при соответствующем среднем напряжении ячейки, 3600 – число секунд в часе.

Будем считать, что хранилище должно единовременно содержать рассчитанную массу водорода. До давления до 20 МПа водород ведет себя как идеальный газ [12], поэтому необходимый объем хранилища составит

$$V = (p_н V_н / p)\, m = (0{,}1 \cdot 11{,}2/5)\, 360 = 80{,}64 \text{ м}^3,$$

где $p_н$ – атмосферное давление, МПа; $V_н$ – удельный объем водорода при нормальных условиях, м^3/кг; p – давление водорода в хранилище, МПа; m – масса водорода, кг.

Для хранения такого объема сжатого водорода можно воспользоваться пятью контейнерами-трубами: длиной 10 м, диаметром 1,22 м и толщиной стенки 20 мм.

Аналогично трубным контейнерам можно использовать баллоны высокого давления объемом 10 м^3 с возможность закачки газа до давления 32 МПа [16].

С учетом существующих нормативно-правовых документов, регламентирующих использование водорода и пожарную безопасность на заправочных станциях (ПБ 03-598–03, Правила противопожарного режима в РФ от 25.04.2012 г. № 390), площадь, занимаемую заправочной станцией с учетом всех допустимых расстояний между объектами, можно оценить примерно в 1 га.

Таким образом, проведенные расчеты показывают перспективность практической реализации предлагаемой концепции заправочной станции с терминалами для электрических и водородных автомобилей. Применение электрохимических систем с ТПЭ для прямого и обратного преобразования электрической энергии в химическую, а также водородного накопителя позволяет не только заправлять водородные автомобили, но и запасать значительные количества энергии, позволяющие сглаживать как суточную, так и сезонную неравномерность поступления энергии от ВИЭ, что особенно актуально для северных территорий России. Создание сети комбинированных заправочных станций с терминалами для заправки электрических и водородных транспортных средств, удовлетворяющих международным стандартам, может дать решающий импульс к широкомасштабному внедрению экологически чистого транспорта, в том числе в удаленных районах, не имеющих подключения к электрическим сетям, и способствовать решению ряда экологических и социальных задач.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках федеральных целевых программ «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы» (соглашение № 8890) и «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» (государственный контракт № 14.516.11.0016).

Литература

1. **Клуманн А., Соллид Ч.** Заправочные станции на основе электролизера для различных проектов в Европе // Альтернативная энергетика и экология. – 2003. – Спец. выпуск. – С. 29.

2. **Муминов М., Бастеев А., Соловей В.** Автономный энерготехнологический комплекс для получения водорода в качестве вторичного энергоносителя // Альтернативная энергетика и экология. – 2004. – № 4 (12). – С. 38-41.

3. **Кирпичникова И.М., Мартьянов А.С., Соломин Е.В.** Преобразование энергии в ветроэнергетических установках // Альтернативная энергетика и экология. – 2010. – № 1 (81). – С. 93-96.

4. **Григорьев А.С., Григорьев С.А., Павлов Д.В.** Аккумулирование энергии с использованием электролизеров и топливных элементов в установках на основе возобновляемых источников энергии // Альтернативная энергетика и экология. – 2012. – № 11. – С. 55-64.

5. **Драганов Б.Х.** Возобновляемые источники энергии в водородной энергетике // Альтернативная энергетика и экология. – 2012. – № 7. – С. 30-32.

6. **Запорожец Ю.М., Кудря С.А.** Ветросолнечные энергетические комплексы с водородным циклом // Альтернативная энергетика и экология. – 2011. – № 8. – С. 36-75.

7. **Алексеева О.К., Козлов С.И., Самсонов Р.О., Фатеев В.Н.** Системы хранения водорода // Транспорт на альтернативном топливе. – 2009. – № 4. – С. 68-75.

8. **Фомин В.М., Шевченко Д.В.** Водородная энергетика и современный транспорт // Транспорт на альтернативном топливе. – 2012. – № 2. – С. 56-60.

9. **Глазков В.А.** Разработка зарядно-заправочных станций для автотранспорта на основе использования возобновляемых источников энергии / В.А. Глазков, В.В. Соловей, Н.С. Голубенко, С.И. Довгалюк, А.А. Шевченко, В.А. Попов // Альтернативная энергетика и экология. – 2011. – № 8. – С. 17-20.

10. **Григорьев С.А.** Получение водорода электролизом воды: современное состояние, проблемы и перспективы / С.А. Григорьев, В.И. Порембский, В.Н. Фатеев, Р.О. Самсонов, С.И. Козлов // Транспорт на альтернативном топливе. – 2008. – № 3. – С. 62-69.

11. **Grigoriev S.A., Porembsky V.I., Fateev V.N.** Pure hydrogen production by PEM electrolysis for hydrogen energy // International Journal of Hydrogen Energy. – 2006. – Vol. 31. iss. 2. – P. 171-175.

12. **Козлов С.И., Фатеев В.Н.** Водородная энергетика: современное состояние, проблемы, перспективы // Под ред. Е.П. Велихова. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2009. – 520 с.

13. **Григорьев С.А., Коробцев С.В.** Электрохимические водородные компрессоры/концентраторы на основе твердополимерного электролита // Транспорт на альтернативном топливе. – 2011. – № 5. – С. 57-59.

14. http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/

15. http://rp5.ru/archive.php

16. http://www.sibenergocom.ru/vodopodgotovitelnoe-oborudovanie/1