

4. Early forest fire detection using low energy hydrogen sensors, Eberswalde, Germany / Jürgen Müller, Jan-Eric Bienge // SYSTEMICS, CYBERNETICS AND INFORMATICS. – 2016. – V. 14. – No. 4. – P. 51-52
5. Правила Устройства электроустановок: Все действующие разделы ПУЭ-6 и ПУЭ-7 2022 год. Последняя редакция. – Москва: Изд-во ЦЕНТРМАГ, 2022. – 464 с.
6. How fragmentation and corridors affect wind dynamics and seed dispersal in open habitats / E.I. Damschena, D.V. Bakera, G. Bohrer // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2014. – V. 111. – No. 9. – P. 3487–3488.
7. Ю.Е. Седельников: Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. – Казань: Изд-во ЗАО “Новое Знание”, 2006 – 300 с.
8. Solar Powered Wireless Forest Fire Detection, Pune, India / D.Y. Patil // International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering. – 2018. – V. 7. – No. 4. – P. 80–83.
9. Investigating the Impact of High Voltage Power Lines on GPS Signal, Egypt / M. Rabba, A. El-Hattab // Fachbeitrag. – 2011. – V. 4. – P. 338–343.

Scientific advisor: PhD in Engineering M.V. Andreev, associate professor of Division for Power and Electrical Engineering, ISHE TPU.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Д.С. Николаев

Томский политехнический университет  
ИШЭ, ОЭЭ, группа 5А01

С каждым годом экологическая повестка становится всё более серьёзной и распространённой. Многие промышленные компании и в частности электроэнергетические начинают задумываться о том, чтобы путём постепенного снижения выбросов углерода в атмосферу прийти к полному отсутствию выбросов парниковых газов. Одним из следствий «зеленой» повестки является развитие возобновляемых источников энергии (ВИЭ). В наше время среди ВИЭ наиболее распространены ветер (ветряные электростанции), вода (гидроэлектростанции) и солнце (солнечные электростанции). У всех них есть ряд серьёзных недостатков, но кроме этих источников существует огромная перспектива использования водорода.

В этой работе будет рассмотрено использование водородных топливных элементов в системах энергоснабжения, будут рассмотрены их перспективы, проведён экономический анализ и современные примеры использования топливных элементов, работающих на водороде.

Уже на протяжении нескольких десятилетий возобновляемые источники энергии занимают свою долю на рынке генерации тепловой и электрической энергии. С каждым годом доля ВИЭ в генерации электроэнергии становится всё больше и в 2021 году уже достигла 30%, большую часть из которых (более 15%) занимает генерация на гидроэлектростанциях. Доля водорода же на сегодняшний день безумно мала и составляет менее 0,5% от общего объёма генерации. Хотя в России развитие ветроэнергетики ограничено непостоянством скорости ветра, дороговизной установки и эксплуатации ветропарков. Солнечные электростанции также сталкиваются с проблемами сложного климата в большей части России: неэффективность в ночное время и сравнительно небольшое количество солнечных дней.

Также всё более актуальным для обсуждения становится вопрос о большем распространении электростанций малой мощности, и для этого есть свои причины. Электростанции малой мощности намного дешевле в строительстве и эксплуатации, при их возведении не требуется инвестировать средства в дополнительную инфраструктуру, а именно в линии электропе-

редачи и подстанции. Связано это с тем, что малые электростанции можно располагать в городах или на небольших расстояниях от них, возможно это благодаря намного меньшему шуму и выхлопам. Также электростанции малой мощности намного проще ввести в объединённую энергосистему, по сравнению со станциями большой мощности.

Таким образом, соединив между собой два актуальных и перспективных направления – электростанции малой мощности и водород в качестве источника электрической энергии, мы можем создать эффективную и экологически более чистую систему энергоснабжения городов и предприятий.

Интерес со стороны экологов к использованию водорода как альтернативного угля, нефти и газу вызван несколькими факторами. Первый фактор – это отсутствие горения, а значит и полное отсутствие или очень низкие уровни выбросов парниковых газов, таких углекислый газ, метан и окись азота.

Принцип работы топливных элементов заключается в принципе обратного электролиза воды. Электроды находятся в электролите, далее водород поступает в элемент, где в реакции с анодом разделяется на протон и электрон. Электроны уходят во внешний контур создавая электроэнергию и приходя на катод, а протоны уходят на катод через мембрану. На катоде же разделённые протон и электрон снова становятся молекулой водорода, а затем водород соединяется с кислородом из чего следует, что на выхлопе мы получаем водяной пар.

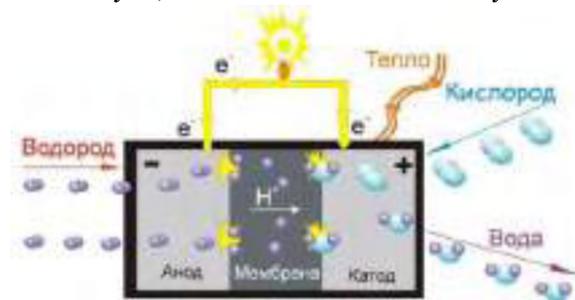


Рис. 1. Принципиальная схема топливного элемента

Сами же ТЭ подразделяются на низкотемпературные и высокотемпературные (ТОТЭ). Помимо водорода также может использоваться ряд углеводородов, биогаз и спирты. Главное отличие таких топливных ячеек от аккумуляторов – необходимость постоянного наличия источника топлива и кислорода, для поддержания химической реакции. По окончании реакции генерация закончится практически сразу.

Самые первые электростанции на топливных были пущены в конце прошлого века, а именно в 1983 году в Японии, тогда эксплуатационные и расчётные оказались сопоставимы друг с другом. При нагрузке от 25 до 80 % от номинальной мощности КПД оказался в пределах 30–37 %, что довольно близко к показателям современных крупных тепловых электростанций. Время пуска из холодного составляло от 4 часов, до 10 минут, а время, которое потребовалось для изменения мощности от нулевой, до максимальной составило всего 15 секунд.

Помимо Японии, экспериментальный ввод небольших установок до 40 кВт практиковался в США. Там установки уже проработали сотни тысяч часов. Использовались они в прачечных, спортивных комплексах и других местах для нагрева воды, коэффициент использования топлива около 80 %. Экологичность данных установок позволила устанавливать их в городах.

Фирма Westinghaus Electric (в наши дни не существует) исследовала свойства топливных элементов на твердых оксидах с 1958 года. В Европе крупнейшими производственными мощностями и наиболее обширными инвестициями в разработку элементов занимаются такие компании как Elenko, Siemens, EnBW, RWE, Fiat, Jonson Metju.

В период с 2004 по 2008 года ГК «Норникель» инвестировала около 160 миллионов долларов в разработки и производство ТЭ, но инвестиционную программу свернули из-за слишком высоких затрат. В 2012 году Институт органической и физической химии им. Арбузова запатентовал топливный элемент малой мощности, позволяющий вырабатывать от 1 до

5 кВт, и выступил с инициативой о возможности создания на базе института производство топливных элементов либо их отдельных деталей при наличии должного финансирования. Также разработки проводились и в Институте физики твёрдого тела РАН, там был разработан твердооксидный топливный элемент (ТОТЭ). Разработанный элемент имеет до 90 % КПД с учётом теплового выхода и до 50 % при учёте только электричества. Ещё одним преимуществом по сравнению с аналогами можно выделить автономность, т. к. такой источник может работать без обслуживания до 4 лет, разработка велась для выполнения задач на удалённых территориях в условиях тяжёлого климата.

Очевидно, что электростанции малой мощности с возможностью быстрого запуска и такой же быстрой остановки найдут своё применение в изолированных энергосистемах. К таким можно отнести местности, приравненные к районам Крайнего Севера (ХМАО, ЯНАО), большая часть Республики Саха, остров Сахалин, полуостров Камчатка и др. В таких местах выход из строя основного источника электро- и теплоэнергии может стать критическим. Так, например, авария на дизельной электростанции в посёлке Депутатский, что располагается в Якутии стала чёрным днём в жизни многих людей. Так 16 февраля 2001 года, после пожара на станции, посёлок погрузился в кромешную темноту и холод. На протяжении нескольких недель не было ни света, ни отопления. Именно такие примеры должны наталкивать на создание дублирующих и резервных систем.

Так, одной из наиболее заинтересованных компаний в надёжных резервных генераторах является «Газпром». Ведя добычу в основе своей на Ямале, «Газпром» требует большого количества энергии, но тянуть высоковольтные линии на полуостров очень дорого и неэффективно, так как потери в линиях на таких расстояниях просто огромны. Следовательно, требуются локальные резервные источники электроэнергии, которые в свою очередь будут включаться во время аварийных ситуаций на основном источнике. Именно здесь максимально раскрываются преимущества водородных топливных элементов, а именно быстрое время включения и выключения, компактность и широкий температурный диапазон работы.

Но при этом есть серьёзные недостатки использования топливных элементов, как конкретно в случае Севера, так и в целом по России. Первое о чём хочется сказать, так это об экономике водородной энергетики. Рыночная стоимость индустриального водорода в баллоне 40 литров составляет около 1860 рублей. Стоимость промышленного модуля на 2,5 кВт составляет 12 185\$ (773 747,5 руб), рассматриваться будет ТЭ ReliOn E 2500 (таблица 1).

Таблица 1. Технические характеристики рассматриваемого ТЭ

|        |        |   |
|--------|--------|---|
| ReliOn | E 2500 | Мощность номинальная: 2500 Вт;<br>Топливо: индустриальный водород с чистотой 99,95%;<br>Окислитель: наружный воздух;<br>Расход топлива: 30 л/мин (0,8 бар) или 3 часа работы из расчета использования одного 40 л баллона с давлением 150 бар;<br>Эффективный КПД: 42%;<br>Средний ресурс: 6000 ч.<br>Рыночная стоимость: 12 185 \$ |
|--------|--------|---|

Суммарная выработка такого элемента будет равняться 15000 кВт·ч. Стоимость израсходованного топлива будет равна 3,72 млн. рублей. И таким образом себестоимость 1 кВт·ч электроэнергии составляет 299,58 руб. В свою очередь, себестоимость киловатта энергии традиционными способами не превышает 5 рублей.

Другим недостатком водорода является его сложное хранение. Водород в твёрдом состоянии легче воды и бензина, а молекулы достаточно малы, чтобы проникать в структуру металла. Также водород взрывоопасен.

Ещё одной проблемой является добыча водорода. Ведь на сегодняшний день все методы его производства не являются экологичными, а некоторые скорее очень и очень вредные.

Топливные элементы не получили своего распространения из-за высокой стоимости оборудования и себестоимости продукта на выходе. Но результаты экспериментальных запусков показывают, что станции на водороде способны эффективно заменить современные методы

генерации. В России на данный момент есть очень яркие перспективы развития, но из-за высокой цены вопросы развитие данной перспективы откладываются.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Гатина Р.З., Гафуров Н.М., Зайнуллин Р.Р. Перспективы развития малой энергетики с использованием топливных элементов. // Вестник КГЭУ, 2018, том 10, № 1 (37)
2. Петрущенко В.А., Коршакова И.А. Качественный и количественный анализ тепловой энергетики малых мощностей в России // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 5. С. 52-70
3. Яруллин Р.С., Салихов И.З., Черезов Д.С., Нурисламова А.Р. Перспективы водородных технологий в энергетике и в химической промышленности // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 2. С. 70-83.
4. Плетнев М.А, Копысов А.Н. Социально-экономические проблемы развития водородной энергетики // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 2. С. 36-45.

Научный руководитель: к.т.н. Р.А. Уфа, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

### УСТРОЙСТВА FACTS (СТАТКОМ)

Д.Д. Сарнаков

Томский политехнический университет  
ИШЭ, ОЭЭ, группа 5А03

FACTS устройства подразделяются на устройства первого и второго поколения.

Устройства первого поколения или FACTS-1 – приборы, которые способны регулировать напряжение и компенсировать реактивную мощность.

Устройства второго поколения или FACTS-2 – это улучшенные устройства FACTS-1. Они обладают свойством векторного регулирования, это свойство, при котором регулируется величина и фаза вектора напряжения.

Из устройств FACTS наиболее часто используются такие устройства как: статический компенсатор реактивной мощности, устройства продольной компенсации, синхронный статический компенсатор (СТАТКОМ), компенсатор реактивной мощности на базе преобразователя напряжения, фазовращательный трансформатор и так далее.

В дальнейшем будет подробнее рассмотрен СТАТКОМ.

Назначение:

Статический синхронный компенсатор решает проблемы с качеством электроэнергии, эффективностью её передачи и распределения. Решение данных проблем достигается за счёт компенсации реактивной мощности и регулирования напряжения. Таким образом, можно сказать, что статком является управляемым источником напряжения, значение внутреннего сопротивления которого, близко к нулю. Подключение синхронного компенсатора производится через линейный реактор, он преобразует разность напряжения в сети в выходной ток компенсатора. Так статком преобразуется из источника напряжения в источник тока. Подключение статического компенсатора представлено на рисунке 1. На основе вышесказанного можно сформулировать, что принцип работы статкома заключается в том, чтобы за счёт векторного управления и широтно-импульсной модуляции выработать мгновенные значения токов и напряжений, которые поступят на устройства.