

УДК 621.43.052

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ ЭКОМОБИЛЯ

**Ф.И. Абрамчук, профессор, д.т.н., А.Н. Врублевский, профессор, д.т.н.,
А.П. Кузьменко, ассистент, к.т.н., С.О. Подлещук, аспирант, ХНАДУ**

Аннотация. Рассмотрены вопросы выбора топливного элемента для привода автомобиля-участника соревнований Shell-EcoMarathon. Проведен анализ принципиальных схем топливных элементов, выбрана наиболее рациональная схема и основные параметры составляющих силовой установки. Представлены результаты расчета характеристик спортивного автомобиля с топливным элементом.

Ключевые слова: спортивный автомобиль, топливный элемент, водород.

ВИБІР І ОБҐРУНТУВАННЯ ПАЛИВНОГО ЕЛЕМЕНТА ДЛЯ ЕКОМОБІЛЯ

**Ф.І. Абрамчук, професор, д.т.н., О.М. Врублевський, професор, д.т.н.,
А.П. Кузьменко, асистент, к.т.н., С.О. Подлещук, аспірант, ХНАДУ**

Анотація. Розглянуто питання вибору паливного елемента для привода автомобіля-учасника змагань Shell-EcoMarathon. Проведено аналіз принципів схем паливних елементів, обрано найбільш раціональну схему та основні параметри складових силової установки. Представлено результати розрахунку характеристик спортивного автомобіля з паливним елементом.

Ключові слова: спортивний автомобіль, паливний елемент, водень.

CHOICE AND JUSTIFICATION FOR FUEL CELL ECO-MOBIL

F. Abramchuk, Professor, Doctor of Technical Science, O. Vrublevskiy, Associate Professor, Doctor of Technical Science, A. Kuzmenko Lecturer, Candidate of Technical Science, C. Podleschuk, postgraduate, KhNAHU

Abstract. The problems of choice of fuel cell of choice to drive the car competitor of Shell-EcoMarathon are considered. The analysis of the concepts of fuel cells, chosen as the most rational scheme and main parameters of the components of the power plant is done. The results of calculation of the characteristics of the sports car with a fuel cell are given.

Key words: sports car, fuel cell, hydrogen.

Введение

К наиболее серьезным проблемам, стоящим перед человечеством, безусловно, относится экологическая проблема. Наряду с локальными экологическими бедствиями, такими как смог в крупных городах, высокий уровень вредных выбросов на отдельных предприятиях, прорывы нефтепроводов и аварии нефтеналивных танкеров, возникли общепланетарные явления, такие как парниковый эффект, озоновые дыры и кислотные дожди

[1]. Наиболее крупный вклад в загрязнение окружающей среды вносит транспорт. Основные выбросы вредных компонентов возникают в результате химических процессов горения топлива в двигателях внутреннего сгорания. Следует также отметить, что процессы преобразования химической энергии в электрическую характеризуются невысокими значениями КПД (20–40 %).

Вместе с тем известны способы преобразования энергии, например электрохимиче-

ский, практически лишены указанных недостатков. Электрохимический способ преобразования энергии осуществляется в топливных элементах (ТЭ) [2, 3].

Анализ публикаций

С практической точки зрения топливный элемент отдаленно напоминает обычную гальваническую батарею. Отличие заключается в том, что изначально батарея заряжена, т.е. заполнена «топливом». В процессе работы топливо расходуется и батарея разряжается. В топливном элементе для производства электрической энергии используют топливо, подаваемое от внешнего источника. Еще в 1824 г. французский ученый Сади Карно показал, что циклы сжатия-расширения двигателя внутреннего сгорания (ДВС) не могут обеспечить КПД преобразования тепловой энергии (являющейся химической энергией сгорающего топлива) в механическую выше 50 %. В отличие от ДВС, топливный элемент не имеет движущихся частей, поэтому процессы, происходящие в ТЭ, не подчиняются закону Карно. Естественно, они будут иметь больший, чем 50 %, КПД и особенно эффективны при малых нагрузках.

Топливный элемент обеспечивает выработку электрического тока постоянного напряжения, который может использоваться для приведения в действие электродвигателя, приборов системы освещения и других электрических систем в автомобиле.

При использовании чистого водорода в качестве топлива продуктами реакции, помимо электрической энергии, являются тепло и вода (или водяной пар), т.е. в атмосферу не выбрасываются газы, вызывающие загрязнение воздушной среды или парниковый эффект. Если в качестве топлива используется водородосодержащее сырье, например, природный газ, побочным продуктом реакции будут и другие газы, например, оксиды углерода и азота, однако его количество значительно ниже, чем при сжигании такого же количества природного газа.

Одним из мотивирующих факторов для развития этого направления в промышленных масштабах является тот факт, что топливные элементы обеспечивают больше энергии на единицу удельного объема, чем традиционные аккумуляторы. Тем не менее, основной

проблемой для широкого использования ТЭ в автомобильной промышленности является недостаточное развитие технологий и трудность в определении оптимальной конфигурации топливных элементов для использования в автомобилях.

Цель и постановка задачи

Целью данного исследования является выбор альтернативной двигателю внутреннего сгорания энергетической установки для экомобиля-участника соревнований *Shell-EcoMarathon*.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ возможных видов топливных элементов, сформулировать требования к ТЭ и выбрать наиболее эффективный для применения на автомобиле;
- определить и обосновать схему силовой установки экомобиля;
- определить возможные параметры элементов энергетической установки, состоящей из топливного элемента, аккумулятора и электродвигателя;
- провести расчет характеристик автомобиля с топливным элементом.

Классификация топливных элементов

Существуют различные виды ТЭ. Их обычно классифицируют по используемому топливу, рабочему давлению и температуре, что определяет область применения, КПД, вид топлива и тип катализатора, используемый в ТЭ.

Наибольшее распространение получила классификация топливных элементов по типу электролита как среды для внутреннего переноса ионов (протонов).

В настоящее время известно несколько типов топливных элементов, различающихся составом использованного электролита:

1. Топливные элементы с ионообменной мембраной (Proton Exchange Membrane Fuel Cells) / твердополимерные ТЭ (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells) – PEMFC (рис. 1).
2. Топливные элементы на основе ортофосфорной (фосфорной) кислоты (Phosphoric Acid Fuel Cells, PAFC).

3. Топливные элементы на основе расплавленного карбоната (Molten Carbonate Fuel Cells, MCFC).
4. Твердотельные оксидные топливные элементы (SolidOxideFuelCells, SOFC).
5. Щелочные топливные элементы (Alkaline Fuel Cells, AFC).
6. Топливные элементы с прямым окислением метанола (DirectMethanolFuelCells, DMFC), топливные элементы с прямым окислением этанола (DirectEthanolFuelCells, DEFC).

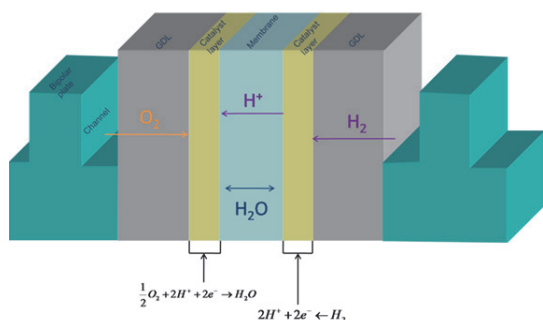


Рис. 1. Схема PEMFC-элемента

Исходя из требований, которые предъявляются к экомобилю, для оснащения его топливным элементом таковой должен иметь следующие свойства:

- 1) обеспечивать достаточную мощность;
- 2) иметь небольшой вес;
- 3) обладать наименьшими габаритными размерами;
- 4) работать при низких температурах реакции.

Выбор топливного элемента для экомобиля

Из всех вышеупомянутых видов топливных элементов таким требованиям более всего отвечают твердополимерные топливные элементы, называемые также ТЭ с ионообменной мембраной. Они обеспечивают высокую мощность и обладают низким весом и объемом по сравнению с другими топливными элементами.

Одна ячейка такого элемента, состоящая из пары электродов и ионообменной мембраны, способна генерировать напряжение порядка 0,7 В. Для увеличения выходного напряжения массив отдельных ячеек соединяется в батарею. Рабочая температура PEMFC-элементов составляет около 80 °С.

Такие топливные элементы отличаются высокой удельной мощностью, позволяют быстро регулировать выходную мощность, могут быть быстро включены. Недостаток этого типа элементов – высокие требования к качеству топлива, поскольку загрязненное топливо может вывести из строя мембрану. Номинальная мощность топливных элементов этого типа составляет 1–100 кВт.

PEMFC-элементы способны работать при относительно низкой температуре окружающей среды и обладают довольно высокой эффективностью (КПД составляет от 40 до 50 %). Низкотемпературный режим работы позволяет им начать работу быстрее (минимальный прогрев) и приводит к меньшему износу составляющих блоков системы, в результате чего наблюдается более долгий срок службы. Однако для их функционирования требуется дорогостоящий катализатор (как правило, платина).

Определение схемы силовой установки автомобиля

В настоящее время существует несколько концептуальных решений использования ТЭ для автомобиля [10, 11]. Наиболее перспективной для транспорта является гибридная схема [10, 12]. В данном случае ТЭ вырабатывает энергию для зарядки аккумуляторных батарей, питающих электродвигатель. Для автомобиля-участника соревнований такая схема недопустима, так как источником энергии для движения должно быть топливо, а аккумулятор можно использовать только для питания бортовых потребителей. Регламентом строго оговорено условие, при котором аккумулятор не может накапливать энергию.

В данной работе для экомобиля предлагается схема (рис. 2), включающая ТЭ с электронным блоком управления (ЭБУ ТЭ) и аккумуляторную батарею.

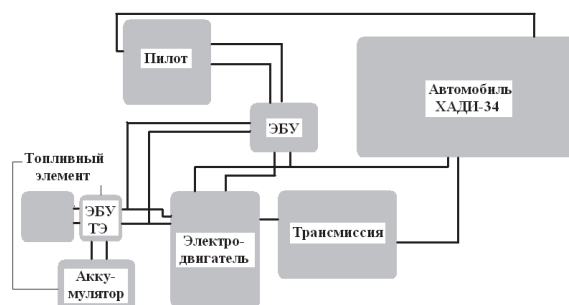


Рис. 2. Схема автомобиля с ТЭ

Энергия, накопленная в аккумуляторе, используется только на старте (рис. 3). Далее работает только ТЭ.

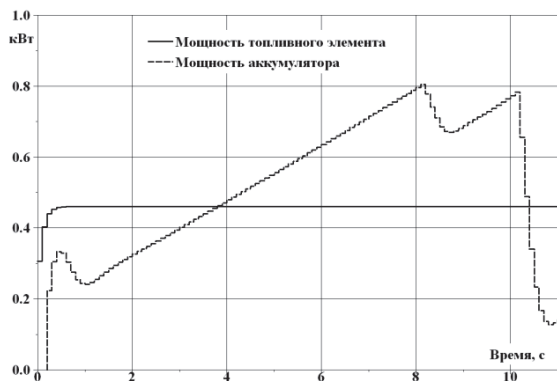


Рис. 3. Мощность, выдаваемая топливным элементом и аккумулятором на старте

Расчет топливного элемента экомобиля

Эффективность работы принятой схемы автомобиля с ТЭ зависит от выбора параметров его компонентов. Опыт участия в соревнованиях Shell-EcoMarathon команды ХНАДУ показывает, что необходимая мощность, развиваемая силовой установкой экомобиля, не должна превышать 800 Вт. Данное условие определяет возможные параметры двигателя, ТЭ и аккумулятора (табл. 1).

Таблица 1 – Рекомендации для выбора параметров элементов силовой установки экомобиля

Параметр	Величина	Ед. измерения
Двигатель		
– мощность	700	Вт
– напряжение	18	В
ТЭ		
– напряжение	18	В
– мощность	450	Вт
– масса	2,5	кг
Аккумулятор		
– напряжение	12	В
– емкость	8	А·ч

Для решения поставленной в исследовании цели выполнена серия расчетов, результаты которых показаны на рис. 3 – 5.

В момент старта мощности 460 Вт, вырабатываемой ТЭ, недостаточно. Поэтому следует с помощью аккумулятора повысить мощность. Аккумулятор компенсирует недостаток мощности (рис. 3). Прогнозируемая задержка старта составляет не более 0,5 с от момента подачи команды на пуск электро-

двигателя. К четвертой секунде пуска мощности ТЭ и от аккумулятора выравниваются. Далее в течение 7 с происходит интенсивная разрядка батареи.

Учитывая потери, изменение мощности, потребляемой двигателем, происходит по кривой рис. 4.

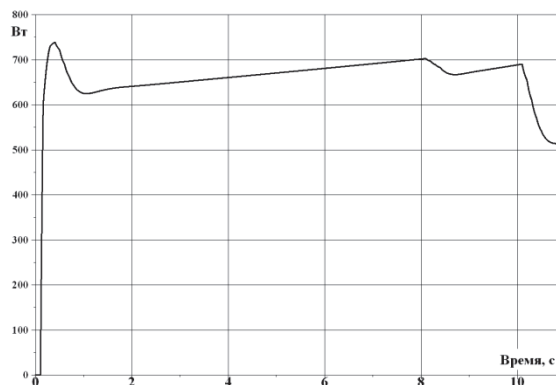


Рис. 4. Мощность, потребляемая электродвигателем на старте

В результате реализации указанного алгоритма старта экомобилю будут обеспечены скорость и ускорение, представленные на рис. 5. Достижение скорости 8,5 м/с происходит на 10-й секунде. Далее мощность двигателя будет снижена и автомобиль движется накатом.

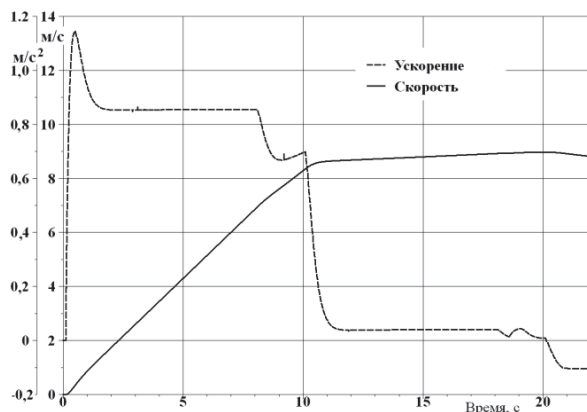


Рис. 5. Скорость движения автомобиля

Расход водорода топливным элементом составляет 9,054 мг/с. Таким образом, на старте автомобиль с топливным элементом потребляет 12120 Дж. Принимая расход энергии на прохождение круга дистанции (1626 м) равным удвоенной величине стартового расхода (0,199 мг), получим в бензиновом эквиваленте расстояние, пройденное на одном литре топлива, равное 3004 км. При условии со-

вершенствования конструкции автомобиля, в первую очередь снижения снаряженной массы, результаты лучших команд-участников соревнования в сегменте «топливный элемент» выглядят вполне достижимыми.

Оптимальным распределением потребителя мощности на экомобиле является схема, при которой ведущими являются два колеса из трех [11]. В таком случае автомобиль необходимо оснастить двумя электродвигателями, расположенными непосредственно в колесе. Мощность каждого двигателя будет составлять не более 200 Вт, а аккумуляторная батарея потребуется только для питания системы управления автомобиля.

Выводы

Сформулированы требования к топливному элементу для использования в экомобиле. Такой элемент должен иметь следующие свойства: обеспечивать достаточную мощность; иметь небольшой вес; обладать наименьшими габаритными размерами; работать при низких температурах реакции.

Из всех вышеупомянутых видов топливных элементов таким требованиям более всего отвечают твердополимерные топливные элементы, называемые также ТЭ с ионообменной мембраной. Они обеспечивают высокую мощность и обладают низким весом (для экомобиля – около 2 кг) и объемом по сравнению с другими топливными элементами.

Для экомобиля предлагается схема, включающая ТЭ мощностью 450 Вт с электронным блоком управления и аккумуляторную батарею (12 В, 8 А·ч). Энергия, накопленная в аккумуляторе, используется только на старте. Далее работает только ТЭ.

Выполненные расчеты показали, что расход водорода топливным элементом составляет 9,054 мг/с. Это позволяет оценить в бензиновом эквиваленте расстояние, пройденное экомобилем на одном литре топлива, равное 3004 км.

Литература

1. Курс общей химии / под ред. Н.В. Коровина. – М.: Высш. шк., 1990. – 446 с.
2. Коровин Н.В. Электрохимическая энергетика / Н.В. Коровин. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 264 с.
3. Коровин Н.В. Энергетика / Н.В. Коровин // Известия РАН. – 1997. – № 9. – С. 49–65.
4. Топливный элемент [Электронный ресурс] // Режим доступа к сайту: [ru.wikipedia.org/wiki/Топливный элем.](http://ru.wikipedia.org/wiki/Топливный_элемент)
5. Юсти Э. Топливные элементы / Э. Юсти, А. Винзель; пер. с нем. И.Г. Гуревича и др.; пер. с англ. Е.Г. Кузнецовой; под ред. акад. А.В. Лыкова и проф. В.С. Багоцкого. – 2-е изд., перераб. и расшир. – М.: Мир, 1964. – 480 с.
6. Иванов В.В. Формирование многослойных структур твердого оксидного топливного элемента / Иванов В.В., Липилин А.С., Спиринов А. В. и др. // Альтернативная энергетика и экология, АЭЭ. – №2 (46). – 2007. – С. 75–88.
7. Rufer A. A direct coupled 4-Quadrant multilevel converter for 16 2/3 Hz traction systems / A. Rufer, N. Schibli, Ch. Brüggen. IEEE. – 1996. – Sept. – No 429.
8. Ozpineci B. Trade study for integrating numerous SECA SOFT modules / B. Ozpineci, L.M. Tolbert, D.J. Adams. Oak Ridge National Laboratory, 2002.
9. Schibli N. A three-phase multilevel converter for high power induction motors / N. Schibli, T. Nguyen, A. Rufer // IEEE on Power Electronic. – 1998. – Vol. 13, № 5.
10. Кириллов Н.Г. Анализ перспективности различных видов альтернативных моторных топлив: сжиженный природный газ – моторное топливо XXI века / Н.Г. Кириллов, А.Н. Лазарев // Двигательное строительство. – № 1. – 2010. – С. 26–33.
11. Университет Zurich // Официальный сайт. – 2013 г. – Режим доступа к сайту: http://www.paccar.ethz.ch/technics/pac_I_vs_II
12. LMS Imagine.Lab AMESim IFP Drive Library Rev 12 User's guide p. 53.

Рецензент: А.В. Бажинов, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 18 октября 2013 г.