

АККУМУЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГИИ В ГИБРИДНЫХ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯХ

А.В. Бажинов, профессор, д.т.н., И.С. Трунова, студент, ХНАДУ

***Аннотация.** Рассмотрены четыре вида аккумулирования энергии в гибридном автомобиле. Проведен анализ технологий аккумулирования и выбор самого эффективного и приемлемого источника энергии.*

***Ключевые слова:** технологии аккумулирования энергии; гибридный электромобиль; аккумуляторная батарея; топливные элементы; конденсаторы; сверхпроводящий электромагнит; маховое колесо.*

Введение

Для улучшения экологии на улицах города, в настоящее время используются гибридные автомобили, которые снижают выбросы вредных веществ в атмосферу по сравнению с существующими автомобилями в 10 – 15 раз.

Для этих автомобилей важно иметь, кроме двигателя внутреннего сгорания, также альтернативные силовые установки. В качестве таких силовых установок используются: электродвигатели, маховичные двигатели, пневмодвигатели и т.д. В качестве источников энергии используют: аккумуляторные батареи, топливные элементы, конденсаторы, сверхпроводящие электромагниты и маховики.

Анализ публикаций

Согласно определению гибриды имеют, по крайней мере, два источника энергии, требующие более низкую удельную энергию аккумулирования, чем чисто электрические транспортные средства. Удельная мощность является определяющей. Энергообеспечение – главная функция аккумулирования в таком транспортном средстве. В гибриде первичный источник энергии подбирается по величине средней мощности, вторичный источник энергии по предельной мощности. [1]. Такой подход принят для ограничения максимума нагрузки.

На рис. 1а изображен городской автобус, имеющий электродвигатель – генератор, который является первичным источником энергии, и систему аккумулирования энергии маховика, который является вторичным источником энергии [2].



а



б



в

Рис. 1. Гибридный электромобиль: а – городской автобус; б – Toyota Prius; в – Honda FCX

На рис. 1б и в изображены два коммерчески доступных гибридных легковых автомобиля: Toyota Prius и Honda FCX. Toyota Prius имеет бензиновый двигатель внутреннего сгорания (ДВС) и блок аккумуляторов, которые являются первичным и вторичным источником энергии, соответственно. В Honda FCX в качестве первичного источника энергии используются топливные элементы и конденсаторы большой ёмкости в качестве вторичного источника энергии.

Цель и постановка задачи

Целью исследования является подбор эффективного источника энергии для гибридных автомобилей.

Технологии аккумулирования энергии

Рассмотрим подробно характеристики технологий аккумулирования энергии. Технологии аккумулирования энергии подразделяют на четыре вида:

- 1) аккумулирование электрохимической энергии: батареи и топливные элементы;
- 2) аккумулирование энергии электрического поля: конденсаторы на металлической пленке, алюминиевые электролитические конденсаторы и конденсаторы большой ёмкости;
- 3) аккумулирование энергии магнитного поля: сверхпроводящий электромагнит;
- 4) аккумулирование кинетической энергии: маховое колесо (маховик).

Эти четыре технологии аккумулирования энергии достигли уровня совершенства и являются коммерчески доступными.

Анализ аккумулирования электрохимической энергии

Аккумулирование электрохимической энергии может быть разделено на два типа: батареи и топливные элементы. Батареи преобразовывают запасенную в них химическую энергию в электрическую. Батареи бывают двух типов: неперезаряжающиеся и перезаряжающиеся.

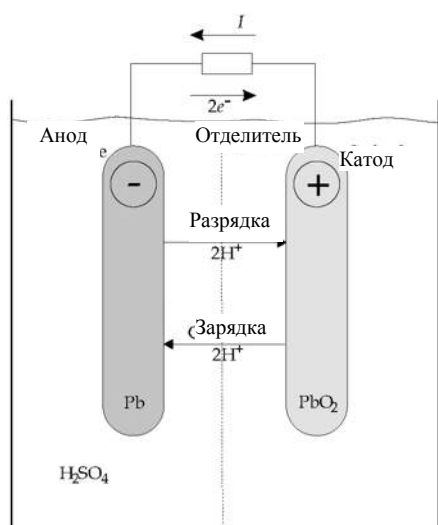


Рис. 2. Свинцово-кислотная батарея

Структура, приведенная на рис. 2 [3], показывает высокое внутреннее сопротивление, которое в частности обусловлено жидким электролитом и низкой контактной поверхностью. Проблема свинцово-кислотных батарей состоит в том, что они имеют различное внутреннее сопротивление в зависимости от того заряжают их или разряжают. Свинцово-кислотная батарея имеет существенные недостатки: длительное время накопления энергии и количество циклов «заряда-разряда» не более 400. Компаниями, производящими мощные батареи, являются: Saft (Франция) и Sanyo (Япония). Saft производит мощные Li-ion (литий-ионные) и NiMH (никель-металлгидридные) батареи специально для гибридных электрических транспортных средств. Li-ion аккумуляторные батареи обладают небольшим весом, минимальным временем зарядки и числом циклов заряда приблизительно 500 – 1200 циклов. Li-ion аккумуляторные батареи применяются в ноутбуках, мобильных телефонах и электромобилях. Sanyo производит NiMH батареи, которые используются в Toyota Prius (рис. 1б). Блок батарей напряжением 288 В, рассчитанный на 1,8 кВт·ч, с полным весом системы 70 кг выдаёт мощность в 38,8 кВт для системы электропривода [4]. Никель-металлгидридные батареи также применяются в ноутбуках, мобильных телефонах и в гибридных энергетических установках.

Топливные элементы относятся к химическим источникам тока. Они осуществляют прямое превращение энергии топлива в электричество, минуя малоэффективные, идущие с большими потерями, процессы горения.

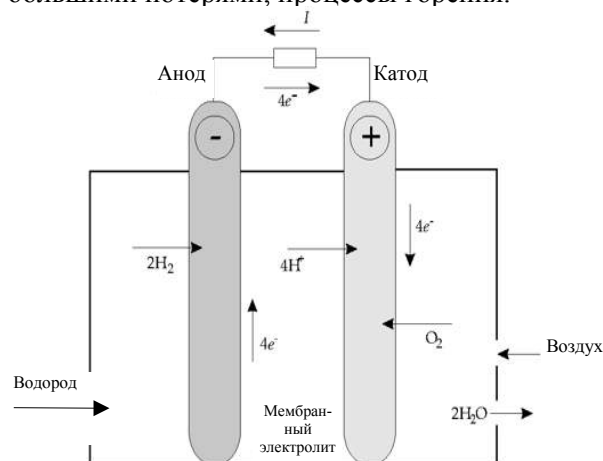


Рис. 3. Ионно-мембранный топливный элемент

Это электрохимическое устройство в результате высокоэффективного «холодного» горения топлива непосредственно вырабаты-

вает электроэнергию. Энергия, преобразованная в электрическую форму ионно-мембранным топливным элементом, равна

$$E_{fc, \text{электр}} = neV_{fc}, \quad (1)$$

где n – число электронов, e – заряд электрона и V_{fc} – электродвижущая сила элемента, 1,23 В.

Анализ аккумулялирования энергии электрического поля

Ёмкостный плоскопараллельный конденсатор на металлической пленке определяется формулой

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A_e}{d}, \quad (2)$$

где ϵ_r – диэлектрическая проницаемость (постоянная), ϵ_0 – диэлектрическая постоянная вакуума, A_e – эффективная плотность (эффективная область) одной из пластин и d – диэлектрическая плотность.

Энергия, аккумулялированная в электрическом поле конденсатора, равна

$$E_e = \frac{1}{2} CV^2, \quad (3)$$

где V – напряжение между пластинами.

Конденсаторы на металлической пленке имеют очень высокую удельную мощность, обычно от 100 кВт/кг до 1 МВт/кг, очень низкое потребление удельной энергии, то есть ниже 0,1 Вт·ч/кг. Причиной этого служит то, что эффективные плотности пластин не являются очень большими, так как они, по существу, являются плоскопараллельной системой. Полное время разрядки плоскопараллельных конденсаторов изменяется в пределах от микросекунд до миллисекунд. Небольшое количество сохраненной энергии, делает конденсаторы на металлической пленке полезными только для ограниченного числа устройств.

В наши дни очень распространены электролитические конденсаторы из-за их высокой ёмкостной плотности [F/m^3], по сравнению

с конденсаторами на металлической пленке. Их называют электролитическими конденсаторами, потому, что диэлектрик сформирован электролитическим процессом. Самым распространённым типом электролитического конденсатора в промышленности является алюминиевый электролитический конденсатор, который изнашивается со временем, и обычно служит в течение 2 – 3 лет, прежде, чем потребует замены.

Конденсатор большой ёмкости – электрохимическое устройство, он аккумулялирует энергию электростатически, а не электрохимически как аккумуляторная батарея. Напряжение пробоя электролита конденсаторов большой ёмкости низкое (ниже 3 В), что ограничивает их практическое применение и понижает требуемую мощность. Конденсаторы большой ёмкости имеют очень большой срок эксплуатации, до 100,000 циклов, со стоимостью приблизительно \$500/кВт.

Эти показатели делают конденсаторы большой ёмкости довольно привлекательным вариантом для устройств с минимальным потреблением мощности.

Анализ аккумулялирования энергии магнитного поля. Сверхпроводящий электромагнит

Катушки индуктивности (индукторы) аккумулялируют энергию в магнитном поле. Количество аккумулялированной энергии определяется формулой

$$E_m = \frac{1}{2} LI^2, \quad (4)$$

где I – поток, текущий в катушке.

Из-за высокого сопротивления несверхпроводников, поток катушки не может быть достаточно высоким, чтобы аккумулялировать существенные количества энергии.

Сверхпроводники имеют три критических параметра: плотность электрического тока, плотность магнитного потока и температуру. Практические сверхпроводники обычно сделаны из NbTi или Nb₃Sn мультинитиды, встроенных в медную или алюминиевую матрицу стабилизации, которая также используется, чтобы поглощать энергию в случае, если сверхпроводник внезапно становится обычным проводником.

Анализ аккумулирования кинетической энергии

Кинетическая энергия, сохраненная в маховой массе, равна Дж

$$E_k = \frac{1}{2} I \omega^2, \quad (5)$$

где I – момент инерции; ω – угловая скорость.

Момент инерции определен массой и геометрией махового колеса и вычисляется как кг·м²

$$I = \int x^2 dm_x, \quad (6)$$

где x – расстояние от оси вращения к дифференциальной (отличительной) массе dm_x .

Общее выражение для максимальной плотности энергии, для всех форм маховика, Дж/м³

$$\hat{e}_{k,v} = K \sigma_{\min}, \quad (7)$$

где K – конструктивные параметры или коэффициент формы, который зависит от геометрии маховика и проявляется в основном с момента инерции I .

На рис. 4 изображены четыре маховика различной формы с соответствующими конструктивными параметрами.

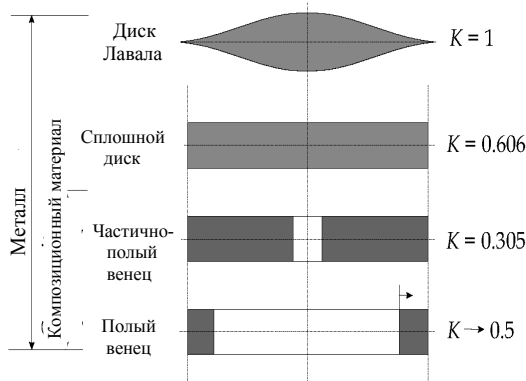


Рис. 4. Четыре различных формы маховика

Первые две конфигурации маховика, показанные на рис. 4, подходят только для изотропных материалов, потому что они могут противостоять высокому напряжению и в тангенциальных и в радиальных направлениях. Последние две конфигурации, показанные на рис. 4, являются подходящими как для изотропных, так и для анизотропных материалов.

В уравнении (7) установлено, что при оптимизации плотности энергии маховика необходимо использовать высокопрочный материал. При высокой удельной энергии материал должен иметь низкую удельную плотность.

Выводы

В ходе проведенных исследований технологий аккумулирования энергии в гибридных электромобилях можно сделать следующие выводы:

- современные электрохимические технологии имеют тенденцию к увеличению удельной энергии, но их удельная мощность ограничена высоким полным внутренним сопротивлением областей контакта;
- технологии сбережения энергии в электрическом поле имеют меньшую удельную емкость, чем другие технологии, но самую высокую плотность энерговыделения;
- технологии хранения энергии в магнитном поле обладают меньшей удельной емкостью, чем аккумулирование кинетической энергией;
- технология хранения кинетической энергии неэффективна из-за больших размеров маховиков.

Из анализа следует, что в настоящее время приемлемым источником энергии является литий – ионная аккумуляторная батарея, которая обладает небольшим весом, минимальным временем зарядки. На наш взгляд, это наиболее перспективное направление.

Литература

1. Holm S.R. Modelling and optimization of a permanent magnet machine in a flywheel. B.V.Pottenbakkerstraat, 2984 Ridderkerk, The Netherlands, 2003.
2. Ross P. 10 Techno-Cool Cars. In IEEE Spectrum, February, 2003.
3. Ter-Gazarian A. Energy Storage for Power Systems, volume 6 of IEE Energy Series. Peter Peregrinus Ltd., London, 1994.
4. Nelson B. TMF Ultra-High Rate Discharge Performance Going Boldly Where No Batteries Have Gone Before. In Proceedings of the 12th Annual Battery Conference on Applications and Advances, pages 139 – 143, Long Beach, CA, USA, 1997.

Рецензент: О.П. Алексеев, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 20 июня 2007 г.