

УДК 544.636

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ***И.Н. Атаманюк¹, Д.Е. Вервикишко¹, А.А. Саметов¹, А.Б. Тарасенко^{1,2},
Е.И. Школьников¹, И.В. Янилкин¹***

¹Объединенный институт высоких температур РАН
125412, Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2
Тел.: (495) 485-96-11, e-mail: 2shkolnikov@ihed.ras.ru
²ООО «НТЦ «ЭНЕРГИЯ»
Якутск, Россия, Ул. 50 лет Советской Армии, д. 5
Тел.: +79035141271, e-mail: a.b.tarasenko@gmail.com

Заключение совета рецензентов: 14.11.13 Заключение совета экспертов: 17.11.13 Принято к публикации: 21.11.13

Прогресс в области различных технологий накопления электрической энергии и развитие технологий возобновляемой энергетики позволяют решать различные задачи с помощью накопителей новых типов в составе солнечных и ветровых энергоустановок. Для компенсации пиковых нагрузок, характеризующихся высокими токами разряда аккумуляторов (например, пусковые токи мощных электродвигателей), по аналогии с гибридными установками электротранспорта могут быть применены суперконденсаторы.

Широкий спектр электродных материалов и электролитов, применяемых в суперконденсаторах, требует подбора определенных комбинаций материалов для достижения требуемых параметров удельной энергии и удельной мощности. Важную роль для работы суперконденсаторов в системах с ВИЭ также играют срок службы и скорость саморазряда суперконденсаторов. Варьируя состав электролита и применяемые электродные материалы, можно создавать системы как с высокой удельной мощностью, так и с высокой энергоемкостью. Структура применяемого активированного угля и технология формирования электрода также оказывает влияние на саморазряд и срок службы суперконденсатора.

Ключевые слова: суперконденсатор, возобновляемые источники энергии, активированный уголь, гибридные энергоустановки.

INVESTIGATION OF NOVEL SUPER CAPACITOR ELECTRODE MATERIALS FOR RENEWABLE ENERGY SYSTEMS APPLICATION***I.N. Atamanyuk¹, D.E. Vervikishko¹, A.A. Sametov¹, A.B. Tarasenko^{1,2}, E.J. Shkolnikov¹, I.V. Yanilkin¹***

¹Russian Academy of Sciences, Joint Institute for High Temperatures
13, Bld. 2 Izhorskaya St., 125412, Moscow, Russia
Tel. : (495) 485-96-11, e-mail: 2shkolnikov@ihed.ras.ru
²“STC “ENERGY”
50 Let Sovyetskoy Armii St., Bldg 5, Yakutsk, Russia,
Tel.: +79035141271, e-mail: a.b.tarasenko@gmail.com

Referred: 14.11.13 Expertise: 17.11.13 Accepted: 21.11.13

Progress in the field of various electric energy storage technologies and the development of renewable energy technologies enable new types of storage devices to solve various problems in solar and wind power. Super capacitors, for example, can be used to compensate peak loads, characterized by high current discharge batteries (such as inrush currents of high-power electric motors) by analogy with hybrid electric vehicles power system.

Wide range of electrode materials and electrolytes used in super capacitors requires selection of appropriate combinations of materials to achieve the desired parameters of specific energy and specific power. Super capacitors lifetime and rate of self-discharge play an important role in the systems with renewable energy sources. Varying the composition of electrolyte and electrode materials used, it is possible to create a system with high power density or high specific energy, depending on storage purposes. The structure of activated carbon and applied technology of the electrode also affects the self-discharge rate and lifetime of the super capacitors.

Key words: super capacitor, renewables, activated carbon, hybrid power systems.



Атаманюк Ирина Николаевна

Сведения об авторе: стажер-исследователь лаборатории алюмоводородной энергетики ОИВТ РАН.

Образование: факультет инженерной химии РХТУ им.Д.И. Менделеева (2011 г.)

Область научных интересов: углеродные материалы, исследование пористой структуры, альтернативная энергетика.

Публикации: 4 тезиса докладов.

Вервикишко Дарья Евгеньевна

Сведения об авторе: мл. научный сотрудник лаборатории алюмоводородной энергетики ОИВТ РАН.

Образование: факультет молекулярной и биологической физики МФТИ (2011 г.)

Область научных интересов: суперконденсаторы, углеродные материалы, исследование пористой структуры.

Публикации: 7 научных статей, около 30 тезисов докладов и 2 патента.

Саметов Анатолий Александрович

Сведения об авторе: стажер-исследователь лаборатории алюмоводородной энергетики ОИВТ РАН.

Образование: факультет инженерной экологии МГУИЭ (2011 г.)

Область научных интересов: накопители электрической энергии, возобновляемая энергетика, альтернативная энергетика.

Публикации: 3 тезиса докладов.

Тарасенко Алексей Борисович

Сведения об авторе: мл. научный сотрудник лаборатории алюмоводородной энергетики ОИВТ РАН, генеральный директор ООО «НТЦ «ЭНЕРГИЯ».

Образование: Высший физический колледж МИФИ (2005 г.)

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии, углеродные материалы, топливные элементы, накопители электрической энергии.

Публикации: 12 научных статей, около 20 тезисов докладов и 4 патента.

Школьников Евгений Иосифович

Сведения об авторе: заведующий отделом алюмоводородной энергетики ОИВТ РАН.

Образование: МЭИ (1971 г.)

Область научных интересов: разнообразные аспекты создания электрохимических устройств на основе топливных элементов и алюмоводородных генераторов, а также процессы переноса в пористых средах, методы и приборы для исследования пористых сред.

Публикации: более 130 научных статей, более 180 тезисов конференций, более 30 патентов.

Янилкин Игорь Витальевич

Сведения об авторе: мл. научный сотрудник лаборатории алюмоводородной энергетики ОИВТ РАН.

Образование: факультет молекулярной и биологической физики МФТИ (2010 г.)

Область научных интересов: суперконденсаторы, углеродные материалы, топливные элементы, алюмоэнергетика, газофазное окисление алюминия, лазерные факелы.

Публикации: 4 научные статьи, около 10 тезисов докладов и 2 патента.

Введение

Постоянное совершенствование аккумуляторов и других типов накопителей электрической энергии и снижение их стоимости позволяет использовать их для решения качественно новых задач, таких, как аккумулярование электрической энергии на длительные периоды отсутствия питания от возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и компенсация пиковых нагрузок потребителя. Наряду с традиционными свинцово-кислотными аккумуляторами все чаще рассматриваются системы на основе водородного цикла и литий-ионные аккумуляторы. В ряде случаев, характеризующихся необходимостью краткосрочных мощных электрических нагрузок потребителя, целесообразным представляется применение суперконденсаторов. Технично-экономические пара-

метры суперконденсаторов во многом определяются применяемыми электродными материалами. В рамках данной работы проведено исследование, направленное на поиск углеродных материалов с оптимальными параметрами для применения в электродах суперконденсаторов.

В настоящее время проблема энерго- и ресурсосбережения как в России, так и в мире стоит достаточно остро. Растущие потребности в электрической энергии заставляют искать новые источники энергии и оптимизировать потребление энергии, получаемой от традиционных систем. Известно, что большинство возобновляемых источников энергии отличается существенными суточными и сезонными неравномерностями генерации, причем для ветровых энергоустановок характерны флуктуации со временем жизни от долей до нескольких секунд [1]. Если длительные пи-



ки и спады генерации мощности могут быть компенсированы электрохимическими аккумуляторами, то для повышения качества выдаваемой электроэнергии оптимальным решением является суперконденсатор на основе двойного электрического слоя (ДСК). Задача подавления флуктуаций характерна также и для дизель-генераторных установок, составляющих основу современной распределенной генерации.

В ряде случаев повышение срока службы и снижение стоимости могут быть достигнуты комбинированием аккумуляторов с ДСК в составе энергетической установки. Похожие схемы используются и в электротранспортных средствах [2]. В такой схеме аккумуляторы обеспечивают энергопитание потребителя в базовом режиме при отсутствии ВИЭ, а переходные процессы компенсируются ДСК [3]. Суперконденсаторы могут быть использованы и в системах питания тех потребителей, электрическая нагрузка которых носит явно импульсный характер [4].

Суперконденсатор представляет собой импульсное электрохимическое устройство, являющееся преимущественно источником мощности. От аккумуляторов различных типов он отличается существенно меньшей энергоемкостью (единицы Вт·ч/кг) и повышенной удельной мощностью (2-10 кВт/кг). Отсутствие фарадеевских процессов при работе ДСК приводит к увеличению его ресурса по сравнению с аккумуляторами, а также к отсутствию ограничений по глубине его разряда [5].

В качестве электродных структур для суперконденсаторов широко применяются углеродные материалы. Причиной этого является ряд уникальных свойств углерода, таких как высокая коррозионная стойкость, достаточная электронная проводимость, высокая температурная стойкость, возможность управления удельной поверхностью и параметрами пористой структуры в процессе синтеза [6]. Кроме того, многообразие форм углеродных материалов также позволяет более гибко подходить к выбору электродных материалов ДСК. Для эффективного формирования двойного электрического слоя в суперконденсаторах необходимо обеспечить высоко-развитую поверхность электродных материалов. Именно поэтому одним из самых распространенных электродных материалов является активированный уголь с большой удельной поверхностью. Различное сырье, отличия в технологии активации и обработки углей позволяют создавать материалы, отвечающие заданным требованиям и характеристикам для их использования при изготовлении электродов суперконденсаторов. Оптимизация структуры активированных углей и электродов на их основе является в настоящее время приоритетным направлением работы по повышению удельных характеристик суперконденсаторов.

Помимо удельной поверхности и проводимости, а также пористой структуры углеродных материалов важным параметром является химическое состояние поверхности электродов, а именно наличие тех или

иных химических поверхностных функциональных групп. Функциональные группы во многом определяют такие параметры ДСК как ток саморазряда, сорбционную способность электрода по отношению к электролиту, контактное сопротивление, угол смачивания [7].

В настоящее время в суперконденсаторах используются как водные, так и органические электролиты. Более высокое напряжение разложения последних (составляет 2,5-3 В против 1 В у водных растворов кислот и щелочей) позволяет создавать суперконденсаторы с высоким рабочим напряжением, тем самым увеличивая их энергоемкость [8]. В то же время, сопротивление большинства неводных электролитов, представляющих собой сложные органические соединения, растворенные в органических растворителях, обычно выше, чем у водных, что, в большинстве случаев, ведет к снижению удельной мощности устройства. Встречаются попытки создания суперконденсаторов с твердым полимерным электролитом [9] на основе перфторсульфополимера под торговой маркой Nafion, широко применяемого в различных электрохимических системах с твердым полимерным электролитом [10].

В настоящей работе рассмотрены вопросы изготовления и испытания макетов суперконденсаторов на основе различных материалов – углеродных структур, активированных различными способами, электролитов на основе органических солей и серной кислоты. Проведены оценки ресурса суперконденсаторов, измерены основные электрохимические параметры.

Экспериментальная часть

Электроды для суперконденсаторов изготавливались методом каландрирования. В качестве связующего использовался фторопласт Ф4. После изготовления электроды высушивались и пропитывались в растворе серной кислоты (плотностью 1,2 г/см³) или органического электролита (1М тетраэтиламмоний тетрафторборат, растворенный в ацетонитриле) под вакуумом. В качестве межэлектродного сепаратора использовался микропористый полипропиленовый сепаратор (Celgard) толщиной 20 мкм. Площадь электродов 4,15 см² (увеличение электродов до 200 см² показало одинаковые удельные энергетические характеристики ДСК).

Сборка ячеек суперконденсаторов из электродов осуществлялась следующим образом. Электроды, разделенные пропитанным электролитом сепаратором, прижимались с обеих сторон фольгой из термо-расширенного графита. Ячейка герметизировалась полиизобутиленом и зажималась (давлением 10 атм.) между позолоченными пластинами, к которым присоединялись клеммы потенциостата. Сопротивление ячейки составляло не более 2,5% от внутреннего сопротивления ДСК и не учитывалось в расчетах его энергоемкости.



Энергоемкость ДСК определялась при его разряде постоянным током после пятиминутной выдержки при разности потенциалов 1 В. Мощность ДСК вычислялась как средняя мощность суперконденсатора в процессе разряда. Скорость саморазряда отслеживалась также после пятиминутной выдержки СК при разности потенциалов 1 В и дальнейшем замыкании цепи. Проверка ресурса работы суперконденсатора проводилась при непрерывном циклическом заряде/разряде постоянным током 239 мА/см² в диапазоне напряжений 0-0,5 В. При этой плотности тока заряд/разряд происходил за время около 7 с. Такой режим был выбран для проведения большого количества циклов и проверки работоспособности суперконденсатора в «нагруженных» условиях.

Результаты и их обсуждение

В работе исследован широкий круг углеродных материалов, произведенных из разного сырья и по различным технологиям (таблица). Были исследованы различные физико-химические характеристики данных материалов, в том числе параметры пористой структуры, определены величины удельной поверхности, элементный и гранулометрический состав, зольность.

Происхождение образцов исследуемых активированных углей

Investigating activated charcoal specimen origin

№	Сырье	Технология
1	Древесина (Т-3)	Термохимический синтез, катализатор NaOH
2	Нефтяной пек (ХН-001W)	Химическая активация, катализатор КОН
3	Рисовая шелуха	
4	Торф (СКТ-6)	Химическая активация, катализатор – раствор серы в гидроокиси калия
5	Торф	
6	Скорлупа кокосового ореха	Парогазовая активация
7	Каменный уголь (УАФ)	

В настоящей статье представлены результаты электрохимических испытаний данных углей в составе суперконденсаторов. На рис. 1 изображена диаграмма Рагона для исследуемых материалов, испытанных в составе суперконденсаторов с серной кислотой в качестве электролита. Видно, что разброс электрохимических характеристик углей большой. В суперконденсаторе на основе исследованного каменного угля (марка УАФ) энергоемкость составила лишь 2,6 Вт·ч/кг в расчете на массу активированного угля. Это очень низкое значение делает данный уголь непригодным для использования в суперконденсаторах.

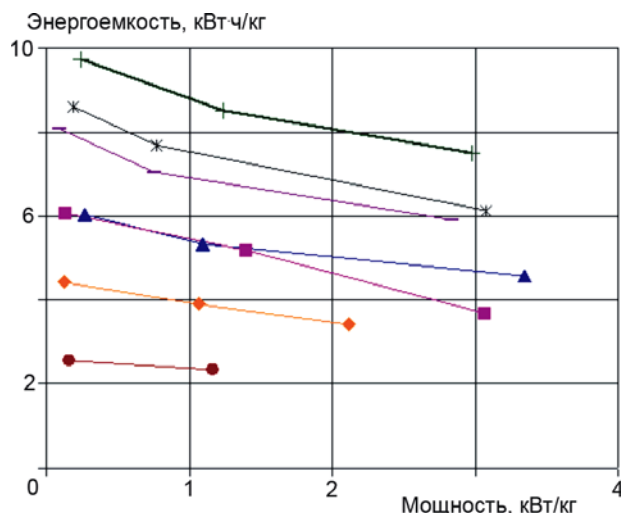


Рис. 1. Диаграмма Рагона для активированных углей, полученных из разного сырья: + – из древесины; * – из нефтяного пека; – – из рисовой шелухи; ■ – из торфа (марка СКТ-6); ▲ – из торфа; ◆ – из скорлупы кокосового ореха; ● – из каменного угля

Fig. 1. Ragone Plot for super capacitor cells, based on activated charcoal, produced from: + – wood; * – petroleum pitch; – – rice peel; ■ – peat (СКТ-6); ▲ – peat; ◆ – coconut; ● – coal

Широко распространенные в России угли из торфа также не продемонстрировали высоких характеристик. Максимальная энергоемкость изучаемых углей (марка СКТ-6) – 6 Вт·ч/кг. Определенный интерес представляют угли из нефтяного пека и рисовой шелухи. Они изготовлены по технологии химической активации. В качестве катализатора использовалась КОН. Энергоемкость данных материалов более 8 Вт·ч/кг. Наиболее высокие удельные характеристики были получены на активированном угле марки Т-3, разработанном при участии соавторов данной статьи [11]. Он получен методом термохимического синтеза из отходов древесины. В качестве катализатора используется NaOH. Возможность управлять параметрами синтеза активированного угля позволила достичь удельной энергоемкости на уровне 10 Вт·ч/кг. Максимальная полученная удельная емкость двойного электрического слоя составила 360 Ф/г. Причем следует иметь в виду, что псевдоёмкость в данных измерениях отсутствует, т.е. не наблюдалось заметных фарадеевских процессов. Данная величина является очень высоким показателем, соответствующим и даже превосходящим мировой уровень.

Из всех исследуемых материалов уголь Т-3 был выбран как основной объект изучения. В работе было проведено детальное исследование свойств данного угля. По литературным данным ресурс суперконденсаторов может составлять до 1 млн. циклов. Это является главным достоинством суперконденсаторов по сравнению с аккумуляторами. На рис. 2 приведены результаты проведенных нами ресурсных испытаний единичной ячейки суперконденсатора на основе данного угля Т-3 с водным электролитом (серная кислота). В силу продолжительности ресурсных испытаний

нами было проведено около 160 000 циклов. Видно, что характеристики находятся на стабильном уровне и не ухудшаются с течением времени. Есть основания полагать, что данные устройства смогут непрерывно работать в течение большого периода времени, что особенно важно, например, для автономных систем, расположенных в труднодоступных местах.

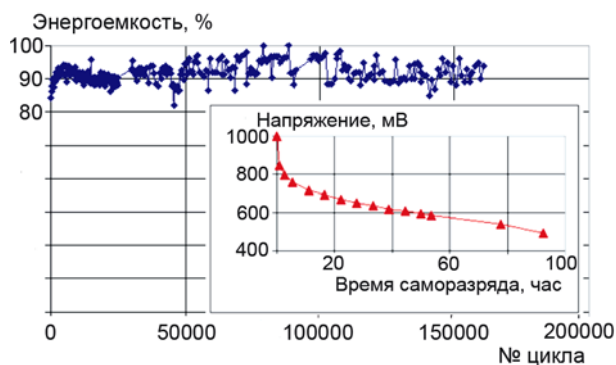


Рис. 2. Ресурсные испытания и саморазряд единичной ячейки суперконденсатора на основе активированного угля из древесины с серной кислотой в качестве электролита
Fig. 2. Lifetime and self-discharge test results for super capacitor single cell. Electrolyte – sulfuric acid solution, electrodes based on wood-derived charcoal

Скорость саморазряда суперконденсаторов – еще один важный параметр. Как видно на рис. 2, изучаемый нами суперконденсатор разрядился с 1000 до 500 мВ за 92 часа. Полученная на сегодняшний день скорость саморазряда является приемлемой для импульсных устройств, которые не предполагается оставлять без подзарядки на срок более 3 суток. Работа по снижению скорости саморазряда и выяснению вызывающих его причин продолжается.

Режимы разряда и заряда суперконденсатора во многом определяют его мощность и энергоёмкость. Разряд большими токами повышает мощность, однако значительная часть энергии при этом либо теряется на сопротивлениях электролита и электродов, либо двойной слой не успевает разрядиться до конца. На рис. 3 для угля Т-3 представлены данные по удельной энергоёмкости и удельной мощности водного и неводного электролитов. Видно, что для систем с водным электролитом удельная энергоёмкость существенно ниже, чем для органического электролита. Более высокое значение удельной энергоёмкости у систем на основе органических электролитов достигается преимущественно за счет высокого рабочего напряжения, однако сопротивление таких электролитов существенно выше (что существенно понижает их КПД на больших токах и приводит к значительному разогреву). В то же время видно, что для органических систем удельная энергоёмкость приближается к таковой для свинцово-кислотных аккумуляторов и проточных ванадиевых редокс-батарей [12], что вместе с высокими ресурсными показателями и повышенной глубиной разряда повышает конкурентоспособность таких суперконденсаторов.

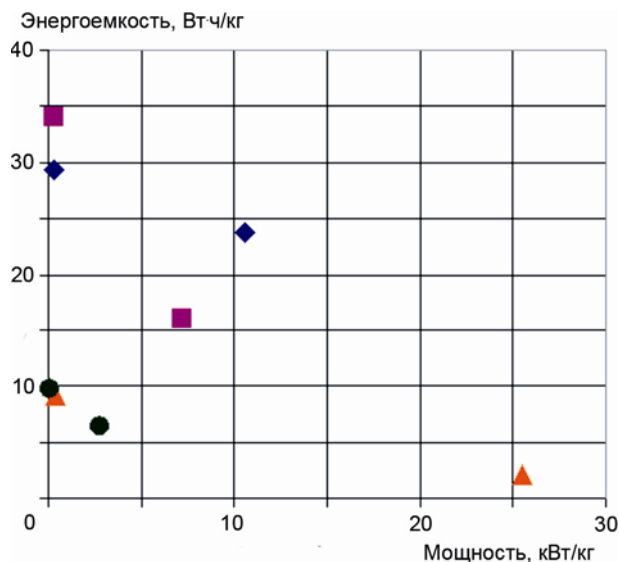


Рис. 3. Диаграмма Рагона для суперконденсаторов на основе угля из древесины. Органический электролит: ■ – электроды 400 мкм; ◆ – электроды 150 мкм. Водный электролит: ● – электроды 400 мкм, ▲ – электроды 150 мкм
Fig. 3. Ragone Plot for super capacitor cells based on wood-derived activated charcoal. Organic electrolyte: ■ – electrodes thickness 400 μm; ◆ – electrodes thickness 150 μm. Aqueous electrolyte: ● – electrodes thickness 400 μm; ▲ – electrodes thickness 150 μm

Таким образом, для суперконденсаторов, применяемых для компенсации пиковых нагрузок, более перспективными представляются водные электролиты. Для систем, где требуется большая длительность работы при относительно малых токах нагрузки – органические электролиты. В случае систем с ВИЭ, основными конкурентами последних по стоимости будут свинцово-кислотные аккумуляторы.

Рассмотрим некоторую систему, где постоянная нагрузка, работающая 2 ч, характеризуется током в 10 А, а пиковая, длящаяся не более 3 с – «набросом» до 40 А (например, пусковой ток электродвигателя насоса). Для 12 В свинцово-кислотных аккумуляторов с глубиной разряда не более 30% и ограничением по токам заряда-разряда 0,3 С (где С – номинальная энергоёмкость аккумулятора) [13] потребуется 60 Ач номинальной энергоёмкости для покрытия базовой нагрузки. В то же время ток в 40 А выходит за пределы допустимых 0,3 С. Следовательно, для сохранения ресурса аккумулятора потребуется установить батарею с общей энергоёмкостью в 120 Ач, то есть в два раза больше той, которая необходима для покрытия базовой нагрузки. В то же время, с учетом того, что расходуемая за время пиковой нагрузки энергия ничтожно мала (0,4 Вт·ч), в системе можно применить суперконденсаторную батарею емкостью 20 Ф, состоящую примерно из 16 ячеек суперконденсаторов с водным электролитом. Диапазон рабочих напряжений батареи составит 10-16 В, что позволяет уложиться в диапазон рабочих напряжений большинства контроллеров заряда. Такая конструкция



позволит уменьшить массу устройства почти в два раза (18 кг батареи + 1 кг ДСК против 36 кг батареи). Следует, однако, отметить, что увеличение времени работы базовой нагрузки до 4 часов делает применение батареи суперконденсаторов бессмысленным – допустимый рабочий ток свинцово-кислотных аккумуляторов также вырастет в два раза из-за увеличения номинальной энергоёмкости. Проведенные оценки показывают, насколько существенно состав системы может зависеть от режима ее работы.

Вместе с тем, если пиковая нагрузка в системе является единственной (например, в случае солнечных водоподъемников, когда целесообразно сразу аккумулировать воду, а не электроэнергию, а основной проблемой становится пусковой ток насоса), то возможности для применения суперконденсаторов резко расширяются.

Заключение

В работе рассмотрены различные варианты электродных материалов для суперконденсаторов и результаты испытаний экспериментальных ячеек с различными электродами и электролитами.

Показано, что на активированных углях из древесины типа Т-3 можно накопить емкость двойного электрического слоя на уровне 360 Ф/г при использовании серной кислоты в качестве электролита. Удельные характеристики стабильны при проведении ресурсных испытаний – более 160 000 циклов. Также изучены характеристики данного угля при применении органического электролита.

Полученные результаты показывают преимущества применения суперконденсаторов с водным

электролитом в нишах, где необходима кратковременная выдача большой мощности, и органических систем – в нишах с необходимостью выдачи энергии в течение более-менее длительных периодов времени. Следует также отметить, что по удельной энергоёмкости суперконденсаторы с органическим электролитом приближаются к свинцово-кислотным аккумуляторам и проточным ванадиевым редокс-батареям, имея преимущество перед ними в части ресурсных параметров.

Проведенные оценки возможных применений суперконденсаторов в энергетических системах, в том числе и на основе ВИЭ, показывают, что преимущества проявляются в тех случаях, когда нужно покрывать кратковременную и достаточно мощную пиковую нагрузку, при том, что продолжительность работы базовой нагрузки не настолько велика, чтобы без последствий принять токи пиковой нагрузки на основную аккумуляторную батарею. Такие свойства присущи, в основном, ветровым энергетическим установкам. Также целесообразно применение суперконденсаторов в системах, где подобные короткие пиковые нагрузки являются основными.

Исследования проводились при финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (соглашение № 8076 от 20 июля 2012 г. между Минобрнауки РФ и Объединенным институтом высоких температур РАН). Авторы выражают искреннюю благодарность ООО «ТЭЭМП» и лично Долголаптеву А.В. (ООО «ТЭЭМП»), Добеле Г.В. (Институт химии древесины, Рига, Латвия).

Список литературы

1. Pickard William F., Shen Amy Q., Hansing Nicholas J. Parking the power: strategies and physical limitations for bulk energy storage in supply-demand matching on a grid whose input power is provided by intermittent sources // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009. № 13. P. 1934-1945.
2. Stienecker Adam W., Stuart Thomas, Ashtiani Cyrus. An ultracapacitor circuit for reducing sulfation in lead acid batteries for mild hybrid electric vehicles // *Journal of Power Sources*. Vol. 154. Iss. 2. 21 March, 2006. P. 561-566.
3. Andreotti A., Mottola F., Pagano M., Velotto G. Design of ultracapacitor based filter for isolated PV source feeding pulsing load // *Electric Power Systems Research*. Vol. 78. Iss. 6. June 2008. P. 1038-1046.
4. Hande Abhiman, Polk Todd, Walker William, Bhatia Dinesh. Indoor solar energy harvesting for sensor network router nodes // *Microprocessors and Microsystems*. 2007. № 31. P. 420-432.

References

1. Pickard William F., Shen Amy Q., Hansing Nicholas J. Parking the power: strategies and physical limitations for bulk energy storage in supply-demand matching on a grid whose input power is provided by intermittent sources // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009. № 13. P. 1934-1945.
2. Stienecker Adam W., Stuart Thomas, Ashtiani Cyrus. An ultracapacitor circuit for reducing sulfation in lead acid batteries for Mild Hybrid Electric Vehicles // *Journal of Power Sources*. Vol. 154. Iss. 2. 21 March, 2006. P. 561-566.
3. Andreotti A., Mottola F., Pagano M., Velotto G. Design of ultracapacitor based filter for isolated PV source feeding pulsing load // *Electric Power Systems Research*. Vol. 78. Iss. 6. June 2008. P. 1038-1046.
4. Hande Abhiman, Polk Todd, Walker William, Bhatia Dinesh. Indoor solar energy harvesting for sensor network router nodes // *Microprocessors and Microsystems*. 2007. № 31. P. 420-432.



5. Деньщиков К.К. Оптимизация взаимодействия наноструктурированных углеродных материалов и электролитов на основе ионных жидкостей для повышения электроэнергетических характеристик суперконденсаторов // Тр. межд. форума по нанотехнологиям (Роснанофорум). Москва, 2008.

6. Pandolfo A.G., Hollenkamp A.F. Carbon properties and their role in supercapacitors // Journal of Power Sources. 2006. № 157. P. 11-27.

7. Conway B.E. Electrochemical supercapacitors – scientific fundamentals and technological applications. Kluwer, New York. 1999.

8. Kurzweil P., Chwistek M. Electrochemical stability of organic electrolytes in supercapacitors: spectroscopy and gas analysis of decomposition products // J. of Power Sources. 2008. № 176. P. 555-567.

9. Lufrano F., Staiti P., Minutoli M. Evaluation of nafion based double layer capacitors by electrochemical impedance spectroscopy // J. of Power Sources. 2003. № 124. P. 314-320.

10. Tsyppin M., Baranov I., Lizunov A., Samoilov D., Fateev V. // In: Proc. of 14th Intern. Congress of chemical and process engineering (Prague, 27-31 August, 2000). P. 61.

11. Dobele G., Vervikishko D., Bogdanovich N., Volpert A., Shkolnikov E. Characterization of the pore structure of nanoporous activated carbons produced from wood waste // Holzforschung – Int. Journal of the biology, chemistry, physics and technology of wood. 2013. № 67(5). P. 587-594.

12. Попель О.С., Тарасенко А.Б. Современные виды электрохимических накопителей электрической энергии и их применение в автономной и централизованной энергетике // Теплоэнергетика. 2001. № 11. P. 2-11.

13. Интернет-ресурс «Ваш Солнечный Дом», http://www.solarhome.ru/catalog/product_info.php?cPath=3_11_40&products_id=616, дата обращения 20.01.2013 г.

5. Den'sikov K.K. Optimizaciã vzaimodejstviã nanostrukturirovannyh uglerodnyh materialov i ãlektrolitov na osnove ionnyh židkostej dlã povyšeniã ãlektroãnergetičeskikh harakteristik superkondensatorov // Tr. mežd. foruma po nanotehnologiãm (Rosnanoforum). Mosk-va, 2008.

6. Pandolfo A.G., Hollenkamp A.F. Carbon properties and their role in supercapacitors // Journal of Power Sources. 2006. № 157. P. 11-27.

7. Conway B.E. Electrochemical supercapacitors – scientific fundamentals and technological applications. Kluwer, New York. 1999.

8. Kurzweil P., Chwistek M. Electrochemical stability of organic electrolytes in supercapacitors: spectroscopy and gas analysis of decomposition products // J. of Power Sources. 2008. № 176. P. 555-567.

9. Lufrano F., Staiti P., Minutoli M. Evaluation of nafion based double layer capacitors by electrochemical impedance spectroscopy // J. of Power Sources. 2003. № 124. P. 314-320.

10. Tsyppin M., Baranov I., Lizunov A., Samoilov D., Fateev V. // In: Proc. of 14th Intern. Congress of chemical and process engineering (Prague, 27-31 August, 2000). R. 61.

11. Dobele G., Vervikishko D., Bogdanovich N., Volpert A., Shkolnikov E. Characterization of the pore structure of nanoporous activated carbons produced from wood waste // Holzforschung – Int. Journal of the biology, chemistry, physics and technology of wood. 2013. № 67(5). P. 587-594.

12. Popel' O.S., Tarasenko A.B. Sovremennye vidy ãlektrohimičeskikh nakopitelej ãlektričeskoj ãnergii i ih primenenie v avtonomnoj i centralizovannoj ãnergetike // Teploãnergetika. 2001. № 11. P. 2-11.

13. Internet-resurs «Vaš Solnečnyj Dom», http://www.solarhome.ru/catalog/product_info.php?cPath=3_11_40&products_id=616, data obrašeniã 20.01.2013 g.

Транслитерация по ISO 9:1995

