

# Высоковольтные, Высокомощные Электрохимические Суперконденсаторы Для Качества Электроэнергии – Технические Требования и Особенности Применения.

А.И. Беляков

305026 г. Курск, пр-т Ленинского Комсомола, 40  
ЗАО «ЭЛИТ», тел. (47122) 46151, e-mail: elit@sovtest.ru

*Представлено*

*на 16<sup>ом</sup> международном семинаре по конденсаторам с двойным электрическим слоем и гибридным устройствам накопления энергии»,  
4-6 декабря 2006 г., Дирфилд-Бич, Фл. США.*

## ВСТУПЛЕНИЕ

Прогресс в промышленном производстве неразрывно связан с увеличением его энергонасыщенности. Тем не менее, самые совершенные технологические процессы очень чувствительны к качеству энергии, необходимой для их осуществления.

За возрастающей чувствительностью сложных электронных систем управления и контроля, высокой ценой изготовления и эксплуатации скрывается их незащищенность к просадкам напряжения питающей сети или к ее кратковременным отключениям. Следствие этого - сбои в работе оборудования, выпуск бракованной продукции, серьезные финансовые потери.

Статистический анализ отказов в электроснабжении, за последние 20 лет, проведенный Electric Power Research Institute (США) показывает, что *98,0% отказов длятся менее 1 секунды*. Но и этого хватает для остановки насосов водоподготовки и горячей воды, вентсистем, распределительных подстанций ЛЭП и узлов, критических процессов в индустрии (нефтепереработка, полупроводники). Ежегодный ущерб в США составляет 5...8 млрд.долларов, в России – более 10 млрд.рублей.

Применение систем бесперебойного электроснабжения (UPS) на базе аккумуляторных батарей для кратковременной мощной компенсации провалов не привели к эффективному результату. Прежде всего, батарейные UPS выдают полную мощность только через 80-150 миллисекунд от начала востребованности. Это принципиальное ограничение, присущее химическим источникам тока. Отсутствие энергии или существенные изменения частоты и напряжения сети в течение 150 миллисекунд приводят к остановке частотно-регулируемого привода и оборудования, которое он приводит в действие. Величина провала *менее 1 миллисекунды (1000 микросекунд) является допустимой для большинства энергетических и промышленных систем*.

Вторая главная причина, препятствующая использованию батарейных UPS – невозможность создания батареи на напряжение 1000 Вольт, 6000 Вольт и т.д. В то же время, «зона отказов» энергоснабжения *лежит именно в этом диапазоне напряжений*. Преобразование (повышение) напряжения с помощью инверторов, к примеру, с 220 Вольт до 1000 Вольт (!) крайне неэффективно физически и увеличивает стоимость системы на порядок.

Появляющиеся в последнее время низкоинерционные мощные UPS начинают применять новые виды источников энергии: гибридная батарея-конденсатор, суперконденсатор и т.д. При времени разряда (время отказа сети) менее секунды, удельная энергия конденсаторных систем приближается к батарейным, а удельная мощность конденсаторной UPS в 4-5 раз выше, чем у батарейной.

В последние годы решена проблема создания устойчивых высоковольтных конденсаторных цепей, вплоть до рабочего напряжения 11 кВ. Кроме того, в отличие от батарей, которые должны быть постоянно под присмотром во время работы UPS, конденсаторные комплекты полностью герметичны и не обслуживаемы в течение всего срока службы системы.

*Таким образом, для исключения многомиллиардных убытков, вызванных кратковременным пропаданием электроснабжения, требуется «небатарейная» UPS высокой мощности, высоко-*

вольтная, быстродействующая, не обслуживаемая, устойчивая к несанкционированным воздействиям при эксплуатации, не оказывающая влияния на окружающую среду.

Все эти критериям отвечают системы компенсации пиковых нагрузок и бесперебойного электроснабжения на базе суперконденсаторов.

## 1. НЕКОТОРЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

В настоящее время высоковольтные суперконденсаторы могут быть легко адаптированы, и уже внедряются без практической переделки оборудования заказчика в следующих объектах:

*а) Подстанции распределительных систем.*

Конденсаторный комплект служит компактным источником мощности для реализации процессов, требующих высоких токов – включения мощных реле. Аккумуляторная батарея, которая имеется на любой подстанции, обеспечивает только слаботочные оперативные нужды и её установленная емкость может быть в 2 раза уменьшена.

*б) Линейные «реклозеры» (автомат повторного включения сети ЛЭП).*

Конденсаторный комплект устанавливается вместо батарейного. В эксплуатации не требуется обслуживания, автоматика контроля заряда чрезвычайно упрощена.

*в) Централизованные распределительные устройства.*

Конденсаторный комплект обеспечивает питание постоянным током электромагнитов высоковольтных выключателей при пропадании основной высоковольтной сети. Это компактный безуходный источник тока.

По ряду других сфер применения требуются некоторые доработки и изменения в аппаратуре заказчика и достаточно долгое согласование технических и административных вопросов. Это:

*г) Подстанции распределительных систем с собственным источником кратковременного поддержания перегрузок.* Это комплекты с уровнем энергозапаса в десятки мегаджоулей. Они уже индустриально доступны, но стоимость силовой автоматики ещё очень велика и недоработан алгоритм включения защиты.

*д) Подстанции заказчиков (потребителей).*

Комплекты конденсаторов с энергозапасом от единиц до десятков мегаджоулей буферизируют входной фидер предприятия, исключая колебания мощности и частоты переменного тока, а также полное пропадание питающей сети в течение 100 мсек – 1...2 сек.

*е) Малые генерирующие системы (ГТЭС: 1МВт...20МВт).*

Энергозапас конденсаторов компенсирует переходные процессы изменения мощности турбоагрегата, выдавая в сеть энергию со стабильными параметрами.

## 2. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ ДЛЯ ИСТОЧНИКОВ ТОКА, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СФЕРЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

*Надежность работы систем повышения качества электроэнергии (PQ) является фактором экономической безопасности, поэтому для источников тока, используемых в этих системах определены достаточно жёсткие требования.*

### 2.1. Показатели назначения

**Быстродействие.** Время выхода на максимальную мощность не должно превышать  $\approx 30$  микросекунд, это позволит реализовать перспективные STATCOM, увеличить надежность срабатывания реле, исключит влияние провала напряжения на электропривод.

**Компактность.** Многие UPS расположены на уровне земли и весовые параметры не играют особой роли, но повышается роль занимаемой площади и объема помещения. Требования по компактности относятся в большей мере к удельной мощности, чем к удельной энергии  $\approx 10-12$  Вт/л при

(2-4 кДж/л). Важным параметром компактности является также «удельное» напряжения В/л (20...100).

Эффективность преобразования энергии/восполнение заряда. Готовность к повторному включению в короткие временные рамки (после срабатывания) предполагает эффективность системы в режиме заряд-разряд не ниже 90%. Кроме того быстрота приведения в готовность определяется максимальным током заряда, который может воспринять система. Это ориентировано 4000 А/Ф запасенной емкости.

#### 2.2. Показатели надежности и безопасности.

- сейсмостойкость по оси установки не менее 10G;
- устойчивость и сохранение всех эксплуатационных характеристик после короткого замыкания и переплюсовки;
- сохранение работоспособности в течение недели после внештатной ситуации по превышению рабочего напряжения конденсаторов на 50%, длительностью 8 часов;
- пожаровзрывобезопасность в вышеперечисленных ситуациях, включая воздействие открытого пламени;
- гарантированный ресурс – не менее 5 лет без регламентного обслуживания.

#### 2.3. Экологические требования.

- изделия должны быть герметичными и не выделять в окружающую среду никаких веществ за весь срок эксплуатации;
- изделия не должны иметь в составе токсические компоненты, должны быть легко утилизируемы по окончании срока службы.

### 3. ИДЕОЛОГИЯ ДИЗАЙНА

#### 3.1. Выбор электрохимической системы суперконденсатора

К настоящему времени потребителю могут быть предложены индустриально освоенные суперконденсаторы 3<sup>я</sup> поколений:

- Углерод/углерод с водным электролитом;
- Углерод/углерод с неводным электролитом;
- Углерод/MeOx с водным электролитом.

Рассматривая эти электрохимические системы в свете специфических требований (п.2 настоящей статьи), проанализируем возможность их применения.

По показателям назначения (п.2.1), только первое поколение отвечает всем критериям. Углерод-углеродные суперконденсаторы с неводным электролитом (II) не обладают достаточным быстрым действием и ограничены токами экстренного заряда, по причине разогрева.

Последнее относится и к системам с идеально неполяризуемыми электродами (III), где зарядный ток ограничивается эффективностью заряда фарадеевского электрода.

По показателям надежности и безопасности все электрохимические системы обеспечивают требуемые сейсмостойкость и ресурс. Однако поколение III ограничено стойко к короткому замыканию и не стойко к переплюсовке, по причине неконтролируемого выделения водорода на фарадеевском электроде. Это также может привести к взрыву модулей суперконденсаторов.

Системы с неводными электролитами (II) принципиально могут быть устойчивыми к КЗ, но не могут противостоять длительной 50% перегрузке по напряжению заряда. Это приводит либо к выпуску взрывоопасных паров электролита, через аварийный клапан, либо разрыву корпусов конденсаторов.

Серьезным ограничением является т.н. «тепловой разгон», т.е. неконтролируемое, лавинообразное повышение температуры устройства из-за КЗ, высокого тока заряда, перезаряда. Этому подвержены все поколения конденсаторов за исключением I (С/С-водный).

Так как мощные UPS могут располагаться в природоохранных зонах (альтернативная энергетика) или в крупных многолюдных промышленных центрах, требования по содержанию и возможному выделению каких-либо веществ из конденсаторов значительно ужесточены. Поэтому суперконденсаторы II поколения с «грязной» органикой, а иногда и с пожаровзрывоопасным ацетонитрилом не проходят по экологичности во многих странах. Суперконденсаторы с фарадеевским электродом (III поколение) более приемлемы с экологической точки зрения, несмотря на содержание в них соединений никеля или свинца. Системы I поколения с водными электролитами практически не имеют ограничений по использованию где угодно.

Резюмируя вышеприведенное, отметим, что только один тип электрохимических систем полностью соответствует специфическим требованиям PQ – углерод/углеродные суперконденсаторы с водными растворами электролитов.

### 3.2. Выбор типа конструкции суперконденсатора

Ещё раз рассмотрим возможные типы конструкций применительно к специфическим требованиям п.2.

Наиболее распространены у производителей суперконденсаторов 3 вида конструктива:

- а) единичные элементы большой ёмкости с рулонными электродами;
- б) единичные элементы большой ёмкости с плоскими электродами;
- в) биполярные системы с электродами небольшой ёмкости.

Первые два вида имеют отдельную токовыводящую цепь: электрод (блок электродов) – терминал, которая занимает до 30% объёма конденсатора. Биполярные системы не имеют внешней цепи элемента, ток проходит по всему сечению электродов ячеек перпендикулярно нормали. Это дает дополнительное преимущество кроме снижения занимаемого объема – снижение омических потерь в цепи электрод – внешний вывод. Биполярные системы являются наиболее компактными из всех конструктивных решений. Низкое собственное внутреннее сопротивление обеспечивает максимальную удельную мощность по объёму (I).

Практическое быстроедействие биполярных систем с водными электролитами исследовано в ранних работах ЭЛИТ (2) и составляет менее 40 мксек на пике максимального тока разряда.

Серийно выпускаемые суперконденсаторы конструкций а) и б) имеют достаточно высокое значение постоянной времени разряда (RC). К примеру: 2700Ф, 0,4 мОм – 1,08 сек RC. Биполярные системы с водными электролитами: 5Ф, 8 мОм – 0,04 сек RC. Как среднеоценочная величина RC может свидетельствовать об эффективности зарядно/разрядного процесса. Можно приблизительно сказать, что биполярные системы с водным электролитом в 20-25 раз эффективнее единичных элементов высокой емкости с неводным электролитом.

По сейсмостойкости, включая вибрационные нагрузки в диапазоне частот, практически все 3 вида конструкций достаточно устойчивы. Конструкция, как правило, мало влияет на устойчивость суперконденсаторов к КЗ, переразряду и перезаряду, пожаровзрывобезопасность и экологию, т.к. это относится к конкретной электрохимии суперконденсатора.

Таким образом, для реализации задач качества энергии наилучшим образом подходят суперконденсаторы биполярной конструкции.

### 3.3. Устойчивость высоковольтной цепи

Для PQ требуются источники тока с рабочим напряжением до 11.000 вольт. Используя суперконденсаторы с неводным электролитом, количество отдельных элементов последовательной цепи превысит 5000 шт! А для систем с водными электролитами количество элементов равно или превосходит число рабочего напряжения, >11.000 шт!

Разброс параметров отдельных элементов последовательной цепи может привести как к неполному использованию запасённой энергии (при снижении  $U_i$  ном.), так и к внезапному обрыву цепи при высоком напряжении единичной ячейки (3) (4). На устойчивость высоковольтной цепи при эксплуатации влияют разбросы по емкости, внутреннему сопротивлению и току утечки отдельных ячеек цепи (5). Влияние каждого из параметров различно и зависит от типа эксплуатации: циклирование, буфер, смешанный режим. К примеру, для циклирования более важна стабильность по емкости и внутреннему сопротивлению, а для буферной работы – ток утечки.

Для качества электроэнергии преобладающим является влияние токов утечки отдельных элементов цепи, так как количество рабочих циклов очень невелико, иногда  $\approx 1$  раз в год.

Индустриальные производители используют различные виды выравнивания напряжения отдельных элементов цепи (б). Самый простой способ - пассивное регулирование путем шунтирования каждого элемента цепи резистором. При этом шунтирующий ток через резисторы должен превышать индивидуальный ток утечки этой ячейки. Более сложный способ – электронный контроль напряжения отдельного элемента и перекачки энергии по вторичной цепи от «сильных» ячеек к «слабым». Применение пассивного регулирования резистором вызывает «паразитные» потери энергии, но в большинстве случаев не превышает 0,01 от практически используемой. В буферном режиме величина «регулирующего» тока утечки не имеет принципиального значения и ограничивается лишь распределением тепла от паразитной утечки. Это, кстати, самый дешевый способ.

Активное регулирование с перекачкой энергии не вызывает «паразитных» потерь, но технически более сложно и его стоимость достигает  $\approx 30\%$  стоимости суперконденсаторов в этой цепи.

Применительно к конструкциям суперконденсаторов, активное регулирование хорошо подходит к элементам большой емкости, а пассивное к элементам малой емкости.

Однако, разница в температуре отдельных элементов цепи в 1000 элементов и их различная степень деградации во времени показывают недостаточность только активного или пассивного регулирования напряжения. Кроме того, способ активного регулирования нельзя встроить в биполярную систему с электродами толщиной 50...100 микрон.

В то же время представляет интерес использование комбинированного выравнивания напряжения: шунт + вентиль. При этом в области высоких напряжений эксплуатации единичной ячейки хорошо работает активная система. Пассивной же системе отводится роль выравнивания во всем диапазоне, но малыми токами.

Применительно к биполярной конструкции предпочтителен активный контроль группы ячеек и пассивное регулирование в единичной ячейке.

Установлено понятие *контролируемой группы ячеек*.

Выбор числа ячеек в контролируемой группе зависит от следующих основных причин:

- технологического разброса параметров ячеек (емкость, внутреннее сопротивление, собственный ток утечки), статистически подтвержденного для конкретного типа активного материала и технологического процесса;
- длины биполярного модуля и распределения температуры по длине. Компенсация разницы в напряжениях: край-центр блока;
- темпа деградации параметров ячеек, изменение тока утечки по годам эксплуатации (на основе ускоренного тестирования при высокой температуре).

На стабильность высоковольтной цепи также влияет тип используемого электролита. Исследования J.R. Miller (7) показали, что высоковольтные модули суперконденсаторов с водным электролитом более устойчивы к длительной буферной работе, чем цепочки из суперконденсаторов с неводным электролитом.

#### 4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ.

Для производства суперконденсаторных комплектов высокого напряжения, применяемых в системах PQ принята следующая концепция:

*Электрохимические суперконденсаторы системы углерод-углерод с водным раствором КОН биполярной конструкции, выполненные в виде модулей на напряжение 100 или 200 вольт, оснащенные системой комбинированного регулирования напряжения (шунт в ячейке, электроника в контролируемой группе) и клапанами выпуска кислорода при длительном превышении рабочего напряжения более 50% от номинала.*

#### 4.1 Комплект для автономного питания цепей управления и включения реле.

##### Характеристика комплекта:

1. Рабочее напряжение	1000 +/- 100В
2. Внутреннее сопротивление	1,5 Ом
3. Емкость	0,18 Ф
4. Вес	60 кг.
5. Объем	41 л.
– пиковый ток	600 А
– пиковая мощность	322 кВт(8к Вт/кг, 4 кВт/л)
– удельное напряжение	24 В/л.

Комплект состоит из 5 модулей x 200 Вольт, соединенных последовательно (см. фото 1, 2).

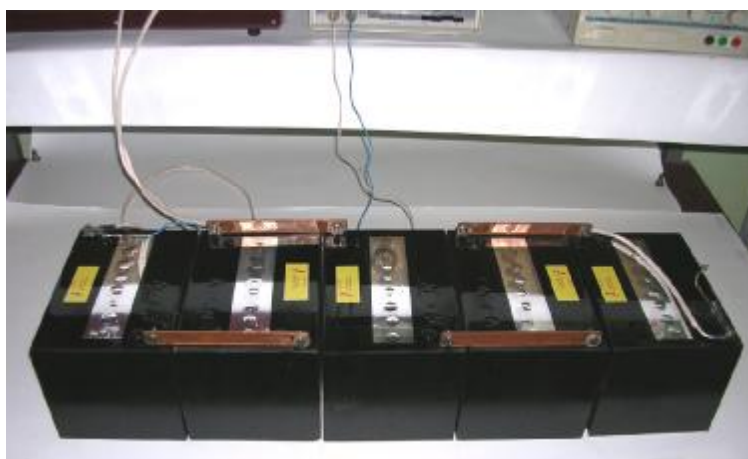


Фото 1. Комплект высоковольтных Суперконденсаторов 1000 В, ( 1000ПП-90.1,5 ).



Фото 2. Модуль 200 В, 18 кДж. (линейка наверху в сантиметрах)

#### 4.2. Компенсаторы пиковых нагрузок.

Это уже готовые для применения изделия, состоящие из суперконденсаторного комплекта, коммутирующей аппаратуры, приборов контроля и регламента; размещенные в индивидуальных стойках. Количество стоек определяется током эксплуатации.

Такие компенсаторы устанавливаются на подстанциях в оперативной сети, где имеются «масляные» выключатели с электромагнитным приводом (вкл-откл) или другие мощные кратковременные нагрузки.

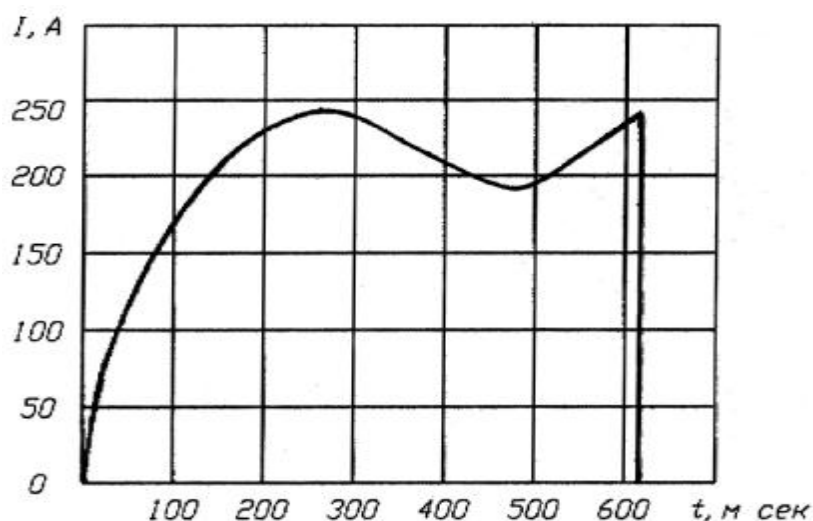
Основные технические характеристики приведены в таб.1.

Таблица 1.

№ п/п	Параметр	Наименование комплекта			
		КТН-100	КТН-250	КТН-500	КТН-750
1.	Номинальное напряжение (В)	110/220			
2.	Номинальный ток ЭМП (А)	100	250	500	750
3.	Электрическая ёмкость (Ф)	18,8/4,7	47,0/11,7	94,0/23,5	141/35,3
4.	Энергозапас (кДж)	114	285	569	854
5.	Внутреннее сопротивление (мОм)	19/76	8/30	4/15	3/10
6.	Количество стоек (шт.)	2	4	6	9

Пример эксплуатации.

Для 3-х кратного включения реле МКП-110М (110 КВ, 50 кВт, питание 220 В) используется комплект КТН 250. Батарея подстанции при этом не участвует в работе. Токовая характеристика реле при однократном включении приведена на рис.3



~ 40 кДж

Рис 3. Зависимость тока реле от времени при включении МКП-110М

Общий вид стойки КТН-100 приведён на фото 4



Фото 4. КТН-100

#### 4.3 Практические преимущества суперконденсаторных комплектов и изделий на их основе:

- 100 % гарантия включения реле при любом состоянии АКБ и любой периодичности следования циклов В/О реле (*особенно важно в период работы оперативного тока от АКБ*).
- Увеличение скорости срабатывания реле (*сокращение времени срабатывания реле на 0,1-0,2 секунды, снижение износа*).
- Уменьшение капитальных затрат в 2 раза при переоснащении подстанций аккумуляторными батареями - *разделение функций выдачи мощности в толчковой нагрузке (суперконденсатор) и хранения (АКБ). При возрастании мощности нагрузки эффект выражается сильнее*.
- Увеличение срока службы «старых» АКБ на 5-8 лет: «старая» АКБ – оперативный ток, конденсаторы – толчковые режимы (*отнесение времени перевооружения/капитальных затрат*).
- Уменьшение издержек эксплуатации за счет снижения объемов техобслуживания (*применение Суперконденсаторов приводит к снижению массогабаритных параметров устанавливаемых АКБ. Сами суперконденсаторы специального обслуживания не требуют*).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Высоковольтные и высокомошные электрохимические суперконденсаторы могут широко использоваться для решения различных задач качества электроэнергии и безопасности энергообеспечения в сетях с напряжением в тысячи вольт. При этом достигается значительная экономия за счет исключения отказов включения и пропадания сети. Кроме того, снимаются издержки в существующей инфраструктуре энергоснабжения (подстанции, привода).
2. Наиболее эффективным является применение суперконденсаторов системы углерод-углерод с водными растворами электролитов, биполярной конструкции и оперативной



системой контроля напряжения ячеек. При этом обеспечиваются все требования заказчиков к аппаратуре электроэнергии:

- высокая удельная мощность;
- компактность;
- пожаровзрывобезопасность;
- отсутствие обслуживания и большой срок службы;
- устойчивость в критических ситуациях;
- экономия использования и утилизации.

Практические, технические преимущества подтверждены поставками и эксплуатацией систем на основе высоковольтных суперконденсаторов.

## **ЛИТЕРАТУРА.**

1. J.R. Miller, "Pulse Power Performance of Electrochemical Capacitors: technical status of present commercial devices", Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Seminar on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices, December 7-9, 1998, Deerfield Beach, FL, USA.
2. A.I. Belyakov, A.M. Brintsev, "Transient Processes in High Power Discharge of Electrochemical Capacitors", Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Seminar on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices, December 8-10, 2003, Deerfield Beach, FL, USA.
3. J.R. Miller, "Electrochemical Capacitor Voltage Balance: cell uniformity requirements for high-voltage devices", Proceedings of the 36<sup>th</sup> International Power Sources Symposium, June 1994, Cherry Hill, NJ, USA.
4. J.R. Miller, S.M. Butler, "Reliability of High-Voltage Electrochemical Capacitors: prediction for statistically independent cells from a single distribution", Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Seminar on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices, December 9-11, 2002, Deerfield Beach, FL, USA.
5. A.I. Belyakov, A.M. Brintsev, "High Voltage Electrochemical Capacitors: Problems, Solutions, Applications", Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Seminar on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices, December 4-6, 2000, Deerfield Beach, FL, USA.
6. A. Burke, M. Miller, "Cell balancing considerations for long series strings of ultracapacitors in vehicles applications", Proceedings of the Advanced Capacitor World Summit 2005, July 11-13, 2005, San Diego, CA, USA.
7. J.R. Miller, S.M. Butler, "Electrochemical Capacitors float-voltage operation: leakage current influence on cell voltage uniformity", Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Seminar on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices, December 3-5, 2001, Deerfield Beach, FL, USA.