

# Силовая электроника в гибридном приводе с топливными элементами.

## Часть 3. Аккумуляторы и суперконденсаторы

**Саму Кукконен  
(Samu Kukkonen)**

**Перевод:  
Евгений Карташев**

**А**ккумуляторы, или аккумуляторные батареи (АКБ), — это устройства, способные сохранять электроэнергию в виде химической энергии внутри своей структуры. Простейшие, «первичные» батареи могут вырабатывать ток сразу после сборки, они функционируют до тех пор, пока не истощится запас реагентов. «Вторичные» аккумуляторы допускают реверс энергии, они способны преобразовывать электрическую энергию в химическую и обратно, то есть ток может проходить в любом направлении. После полной разрядки вторичные батареи перезаряжаются, их свойства (так же, как и первичных) зависят от типа и технологии изготовления.

На транспорте используются четыре типа вторичных аккумуляторов: свинцово-кислотные, никель-кадмиевые (Ni-Cd), никель-металлогидридные (Ni-MH) и литий-ионные (Li-Ion). За последние годы литий-ионная технология сделала большой шаг вперед, сейчас она считается лучшей для применения в составе транспортного привода [3], поэтому в данной работе мы не будем рассматривать устаревшие типы Ni-Cd и Ni-MH. Однако дешевые свинцово-кислотные аккумуляторы все еще считаются хорошим вариантом в случаях, когда нет особых ограничений по размеру и весу, например в вилочных погрузчиках.

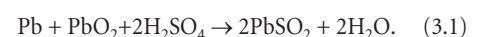
Поскольку единичные аккумуляторные ячейки обеспечивают очень низкий уровень сигнала, их необходимо соединять последовательно, чтобы довести напряжение до приемлемого уровня. При использовании DC/DC-конвертера напряжение батареи может быть значительно ниже, чем DC-шины, поэтому такая схема существенно упрощает конструкцию системы питания.

### Свинцово-кислотная батарея

Технология Pb-Acid широко известна и хорошо отработана. Она отличается низкой плотностью энергии, средней плотностью мощности, низким сроком службы и малой энергоэффективностью

по сравнению с другими типами аккумуляторов. Свинцово-кислотные батареи имеют анод из чистого свинца (Pb) и катод из оксида свинца (PbO<sub>2</sub>), которые погружаются в электролит на основе серной кислоты (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Они могут заполняться электролитом при изготовлении или выпускаться с регулирующим герметизированным клапаном (VLR-батарея), в этом случае электролит иммобилизован с помощью гелеобразной структуры или микроволоконных стеклянных матов [24].

По конструкции оба типа АКБ сильно различаются, однако химическая реакция в них одинакова, во время разряда она описывается следующим образом [24]:



Теоретическое напряжение холостого хода свинцово-кислотной ячейки составляет 2,1 В. Энергия и плотность мощности зависят от конкретного применения, эти показатели не могут быть максимизированы одновременно. Плотность энергии ячейки достигает 35 Вт·ч/кг при согласованной плотности мощности 250 Вт/кг [24] [3], или 25 Вт·ч/кг, при 390 Вт/кг [3]. Срок службы свинцово-кислотных батарей составляет 50–500 циклов, но применение специальных конструкций позволяет улучшить этот показатель. Ресурс таких АКБ уменьшается в условиях повторяющихся глубоких циклов разряда, поскольку это приводит к кристаллизации сульфата свинца на электродах. Для циклических применений предусмотрен особый тип источников, называемых батареями многократного цикла глубокого заряда-разряда [24].

### Литий-ионная батарея

Новейшая литий-ионная технология является самой дорогой и наиболее исследованной. В настоящее время она обеспечивает высочайшую плотность энергии, а по плотности мощности и энергоэффективности Li-Ion-батареи значительно лучше свинцово-

кислотных. Литий-ионные аккумуляторы широко распространены в электронике, в последние годы они получили мировое признание как один из лучших накопителей энергии для электромобилей.

Существует несколько различных вариантов Li-Ion-структур в рамках научно-исследовательских работ. Реакции внутри ячейки Li-Ion зависят от технологии изготовления, фундаментальные свойства основных литий-ионных химических структур представлены в таблице 1 (по состоянию на 2008 год) [25].

Литий-ионная батарея имеет высокое напряжение холостого хода (3,3–4,1 В в зависимости от химического состава). Этот факт является основной причиной большой емкости Li-Ion-аккумуляторов по сравнению с другими типами [25]. В 2007 году появились батареи с плотностью энергии 60–70 Вт·ч/кг и согласованной плотностью мощности 1500–4000 Вт/кг (или 100–140 Вт·ч/кг при 500–1300 Вт/кг) [3]. В 2008 году компания Saft достигла ресурсного показателя более 3000 циклов, а фирма Kokam утверждает, что превышен показатель 3000 циклов при 80%-ной глубине разряда (DoD) в течение срока службы около 10 лет [25].

Безопасность всегда была главной проблемой литий-ионных АКБ, причем этот показатель чрезвычайно важен для автомобильных применений. Ячейки Li-Ion при перезаряде способны высвобождать огромное количество энергии, горючих газов и токсичных химических веществ [25]. В сочетании с литий-ионными аккумуляторами часто используется система контроля, необходимая для предотвращения опасных ситуаций. Вероятно, для решения вопросов безопасности в конечном итоге придется применять более стабильные и безопасные химические структуры. Электронный DC/DC-преобразователь может играть ключевую роль в системе управления, поскольку способен контролировать ток батареи.

**Динамические характеристики свинцово-кислотных батарей**

Для понимания процесса взаимодействия батареи и DC/DC-конвертера необходима до-

**Таблица 1.** Особенности литий-ионной технологии

Технология катода	Основные свойства
LiCoO <sub>2</sub>	Широко используется в электронике Высокая способность к хранению энергии Высокая химическая стабильность Относительно дорогая технология
Li(Ni <sub>0,85</sub> Co <sub>0,1</sub> Al <sub>0,05</sub> )O <sub>2</sub>	Характеристики, близкие к LiCoO <sub>2</sub> , при меньшей стоимости
Li(Ni <sub>1/3</sub> Co <sub>1/3</sub> Mn <sub>1/3</sub> )O <sub>2</sub>	Дешевле, чем Li(Ni <sub>0,85</sub> Co <sub>0,1</sub> Al <sub>0,05</sub> )O <sub>2</sub> Два возможных уровня напряжения, максимальный — 4,1 В При высоких уровнях напряжения ускоряется процесс деградации, но ячейки имеют отличную способность к хранению энергии, соответственно, лучшее соотношение цены и емкости При низком уровне напряжения лучше стабильность, но существенно ниже емкость, и соотношение цены и емкости выше
LiMnO <sub>2</sub>	Высокая стабильность Ниже способность к хранению энергии по сравнению с другими технологиями Минимальная стоимость, компенсирующая меньшую емкость
LiFePO <sub>4</sub>	Меньшее напряжение ячейки по сравнению с другими технологиями Очень высокая стабильность и высокая стойкость к перезаряду Достаточная способность к хранению энергии Приемлемая цена

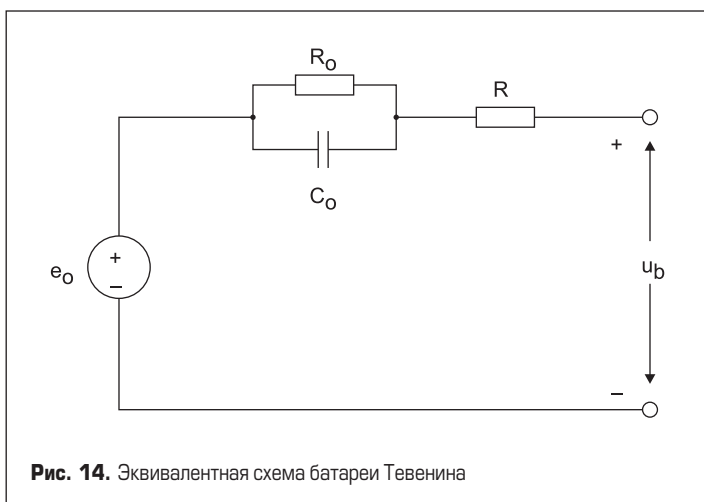
стоверная физическая модель. К сожалению, точной динамической модели АКБ в виде эквивалентной электрической схемы не существует, хотя она позволила бы провести анализ внутреннего состояния системы питания. Основная проблема состоит в том, что такая модель должна учитывать все факторы, влияющие на функционирование источника энергии.

В зависимости от применения разработано несколько эквивалентных схем, имеющих свои особенности [26]. Одной из наиболее распространенных является так называемая модель Тевенина, показанная на рис. 14. На самом деле она повторяет эквивалентную схему топливного элемента, описанную ранее и имеющую аналогичные проблемы [26].

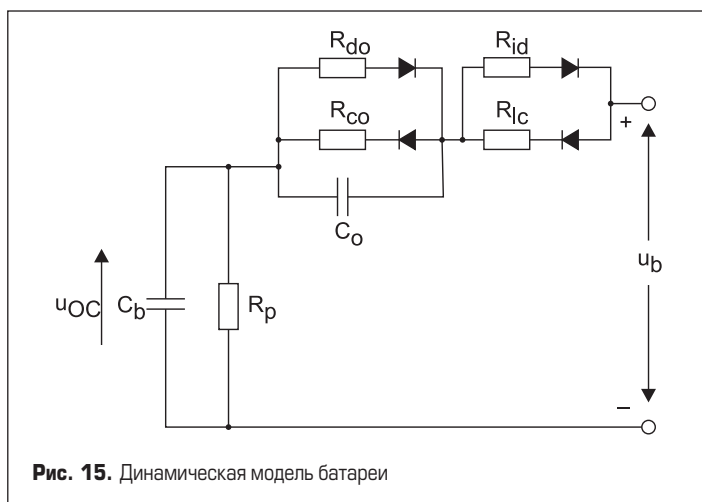
В схеме на рис. 14 блок e<sub>0</sub> представляет собой идеальное напряжение аккумулятора, цепь C<sub>0</sub>R<sub>0</sub> описывает емкость двухслойного конденсатора батареи и падение напряжения, вызванное кинетикой электродов и Фарадическим процессом в условиях нагрузки. Потери активации при малых токах нагрузки и потери массообмена при больших токах снижают идеальное внутреннее напряжение батареи. Элемент R представляет сопротивление электролита и пластин аккумулятора [26]. Для повышения точности на высоких частотах в схему необходимо добавить последовательную индуктивность, как обсуждалось ранее.

Более точные результаты дает использование динамической модели, представленной на рис. 15 и имеющей отдельные цепи заряда и разряда. Идеальный источник напряжения отображается конденсатором C<sub>b</sub>, сопротивление R<sub>p</sub> моделирует саморазряд аккумулятора. Идея модели состоит в использовании результатов измерений для создания функций, отражающих изменение емкости и сопротивления. Эта эквивалентная схема считается наиболее точной, однако она и гораздо сложнее [26]. Фактический процесс изменения параметров системы не представлен в рамках данной статьи, но его описание можно найти в [26]. Тестирование модели показало очень высокое качество отображения процесса разряда, точность симуляции режима заряда пока что неизвестна. Поскольку аккумуляторы и топливные элементы являются электрохимическими устройствами, неудивительно, что спектры их импедансов схожи [27].

Влияние пульсаций, создаваемых конвертером, на работу батареи до сих пор детально не исследовано. Основным выводом состоит в том, что ВЧ-колебания замыкаются через внутренний двухслойный конденсатор и, следовательно, не приводят к фатальным изменениям в материале электрода. Однако низкочастотные колебания, генерируемые однофазными инверторами, влияют на активные материалы и, соответственно, при-



**Рис. 14.** Эквивалентная схема батареи Тевенина



**Рис. 15.** Динамическая модель батареи

нимают участие в химических реакциях. Исследования по данной тематике проводились в основном в ситуациях, когда происходит изменение полярности батареи, то есть от разряда до заряда в процессе цикла колебания. При анализе низкочастотных процессов были получены противоречивые результаты, которые не учитывают изменение полярности. Пульсирующие токи создают дополнительные потери мощности в батарее, а значит, вызывают повышение ее температуры и сокращение срока службы [28]. До сих пор не определены лимиты по уровням пульсаций, необходимые для проектирования электронных конвертеров, предназначенных для работы с батареей.

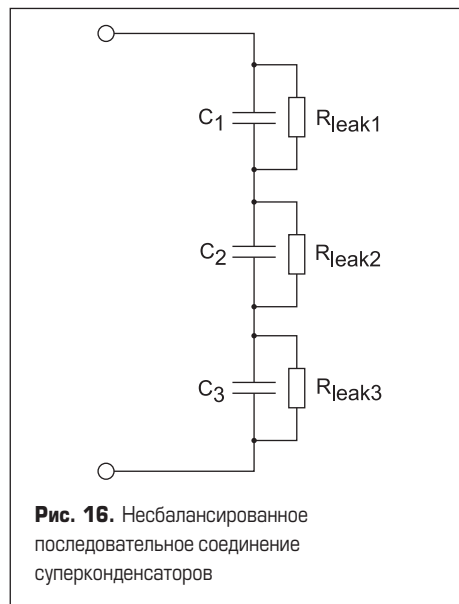
**Суперконденсаторы**

Суперконденсаторы, как и обычные конденсаторы, накапливают энергию в электрическом поле, что позволяет получить очень высокую удельную мощность. В отличие от обычных компонентов суперконденсаторы способны хранить значительные объемы энергии, при этом они сохраняют большинство положительных свойств обычных емкостей.

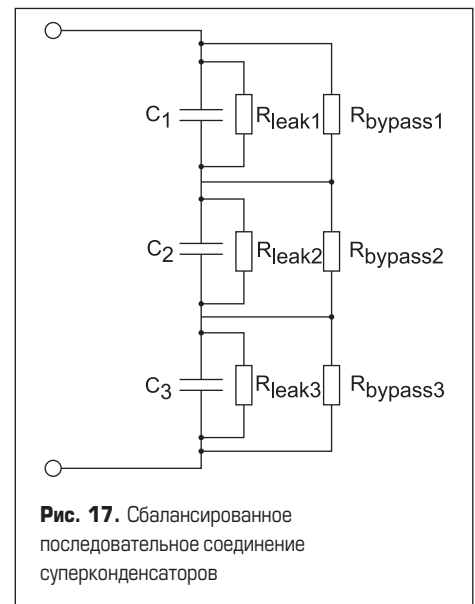
Классический конденсатор образован двумя плоскими пластинами, между которыми находится диэлектрический барьер. Его емкость зависит от диэлектрической постоянной изолятора, общей площади обкладок и расстояния между ними. Диапазон достижимых емкостей определяется физическими ограничениями по максимальному напряжению и габаритам [29]. Основным способом ее повышения является увеличение площади пластин. Это может быть достигнуто за счет наращивания их физических размеров или путем использования губчатой конструкции с пористым электролитом.

Суперконденсатор также имеет два перекрывающихся электрода, на верхней части которых находится пористый материал, наполненный электролитом. Это эффективно увеличивает общую площадь поверхности пластин. Между пористыми электродами расположен сепаратор, предотвращающий их замыкание. Накопление и хранение энергии происходит посредством адсорбции и десорбции ионов на границе раздела электролита и электрода. Процесс хранения энергии, таким образом, является электрохимическим, причем химической реакции не происходит [29, 30]. Современные суперконденсаторы имеют плотность энергии около 4 Вт·ч/кг при плотности мощности 7 кВт/кг, а их ресурс может достигать 1 млн циклов, что значительно выше, чем у аккумуляторов [31].

Суперконденсаторы подходят для применения в импульсных преобразователях, поскольку процесс их заряда/разряда происходит очень эффективно. В гибридных трансмиссиях на топливных элементах суперконденсаторы могут использоваться для подавления переходных процессов при быстрых изменениях нагрузки, которые негативно влияют на надежность топливных элементов.



**Рис. 16.** Несбалансированное последовательное соединение суперконденсаторов



**Рис. 17.** Сбалансированное последовательное соединение суперконденсаторов

Суперконденсаторы способны выдерживать очень мощные и короткие импульсы тока (около 2 кА при 48,6 В для элемента емкостью 165 Ф [31]). При параллельном включении с аккумулятором мощные возможности суперконденсаторов позволяют применять батарею с меньшей плотностью мощности, которая в свою очередь обеспечивает большую плотность энергии. Высокая эффективность перезаряда суперконденсаторов используется для улучшения общих энергетических показателей системы.

Максимальное рабочее напряжение единичной ячейки суперконденсатора примерно 3 В [32], для доведения напряжения до «работоспособного» уровня они соединяются последовательно. Применение DC/DC-преобразователей обеспечивает некоторую свободу в этом вопросе, так как фактическое напряжение суперконденсатора может быть ниже, чем DC-шины.

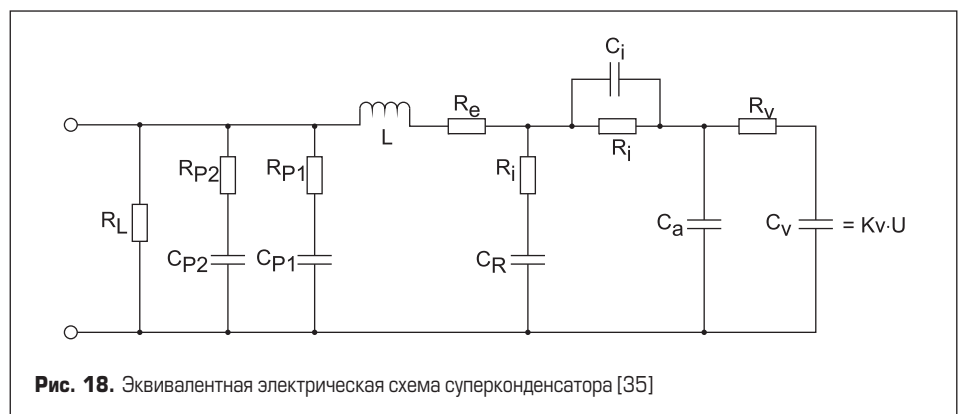
При последовательном соединении ячеек необходимо учитывать ряд моментов. В процессе начального заряда распределение напряжения между ячейками определяется их емкостью, поскольку они пропускают одинаковый ток. После того как суперконденсатор становится способным поддерживать заряд в течение некоторого времени, распределение напряжения становится функцией тока утечки отдельных ячеек. Сопротивления утечки могут отличаться очень сильно, соответствен-

но и напряжения ячеек будут разными, как показано на рис. 16.

Традиционным методом компенсации небаланса напряжений является использование выравнивающих резисторов (рис. 17).

Предположим, единичная ячейка суперконденсатора имеет ток утечки  $(10 \pm 3)$  мкА. Установка выравнивающего резистора с допуском 1%, проводящего 100 мкА, приведет к увеличению тока до  $(110 \pm 4)$  мкА. Таким образом, вариации тока утечки между ячейками снизятся с 30 до 3,6%. Если параллельные сопротивления одинаковы, ячейки с более высоким напряжением будут разряжаться через них быстрее. Это помогает распределять сигнал более равномерно, однако у данного метода есть очевидный недостаток — повышенный саморазряд.

Необходимо найти компромисс между увеличением тока саморазряда и временем балансировки: чем быстрее наступает баланс напряжений, тем скорее разряжаются емкости через уравнивающие сопротивления. При циклических режимах работы, свойственных гибридному приводу, традиционный метод балансировки с помощью резисторов может быть проблематичным из-за ограниченной скорости балансировки по сравнению со скоростью саморазряда. Для таких применений используется активная балансировка [33], позволяющая снизить ток саморазряда и сократить время, а также реализовать более



**Рис. 18.** Эквивалентная электрическая схема суперконденсатора [35]

сложные функции, например температурную компенсацию [34].

### Динамические характеристики суперконденсаторов

Суперконденсатор — элемент динамический, его емкость, сопротивление и реактивное сопротивление зависят от частоты, напряжения и температуры. С учетом физических явлений в двухслойной структуре суперконденсатор не может быть описан с помощью простой эквивалентной схемы. Существует много разных динамических моделей, наиболее полная из них представлена в [35]. Эквивалентная электрическая схема, созданная на основе электрохимической импедансной спектроскопии, показана на рис. 18, описание компонентов модели приведено в таблице 2.

В [35] определены значения различных компонентов ячейки суперконденсатора Maxwell BCAP0010 (2600 Ф/2,5 В), они приведены при температуре 20 °С:

- $U = 2,5$  В;
- $L = 25$  нГн;
- $R_{i(20^{\circ}\text{C})} = 0,25$  МОм;
- $R_e = 0,22$  МОм;
- $C_i = 260$  Ф при  $f < 15$  Гц;  $3900/f$  при  $f > 15$  Гц;
- $R_V = 0,5$  МОм;
- $C_R = 260$  Ф;
- $C_a = 1700$  Ф;
- $K_V = 195$  Ф/В;
- $R_L = 250$  Ом;
- $C_{P1} = 65$  Ф;
- $C_{P2} = 65$  Ф;
- $R_{P1} = 0,6$  Ом;
- $R_{P2} = 4$  Ом.

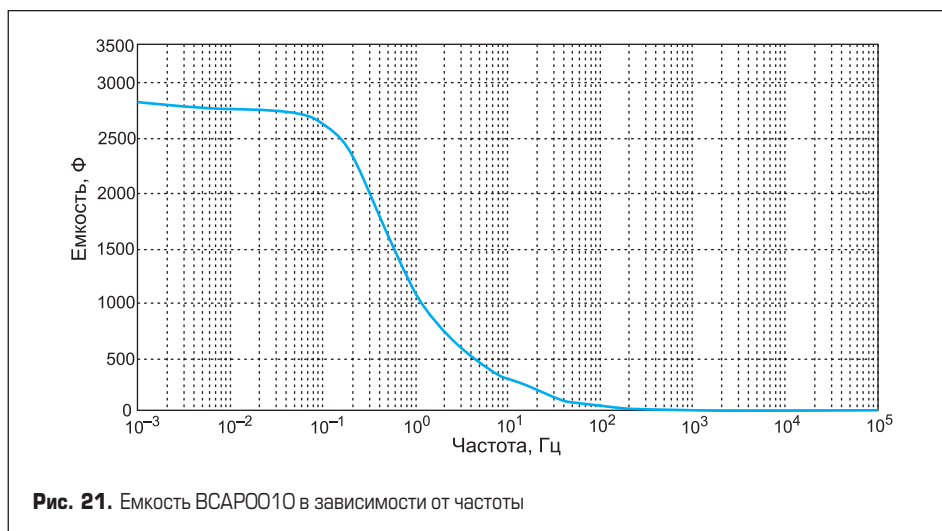
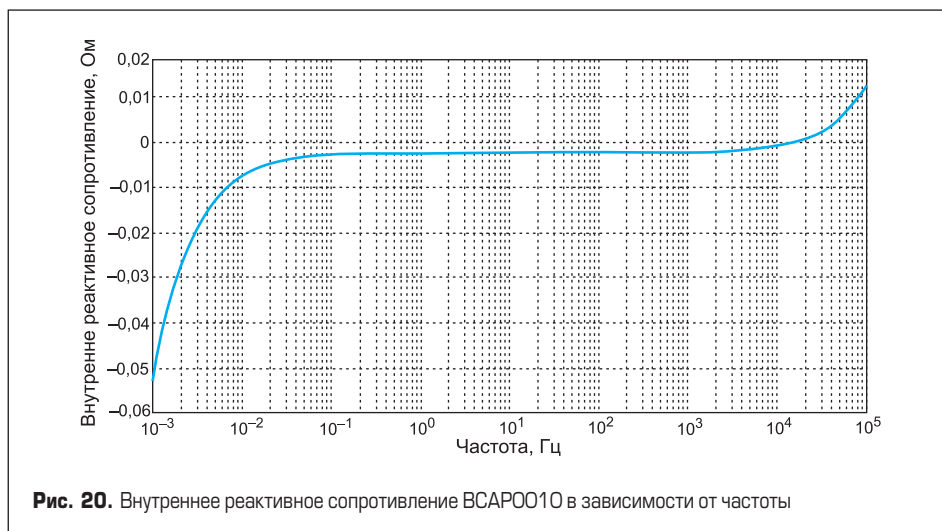
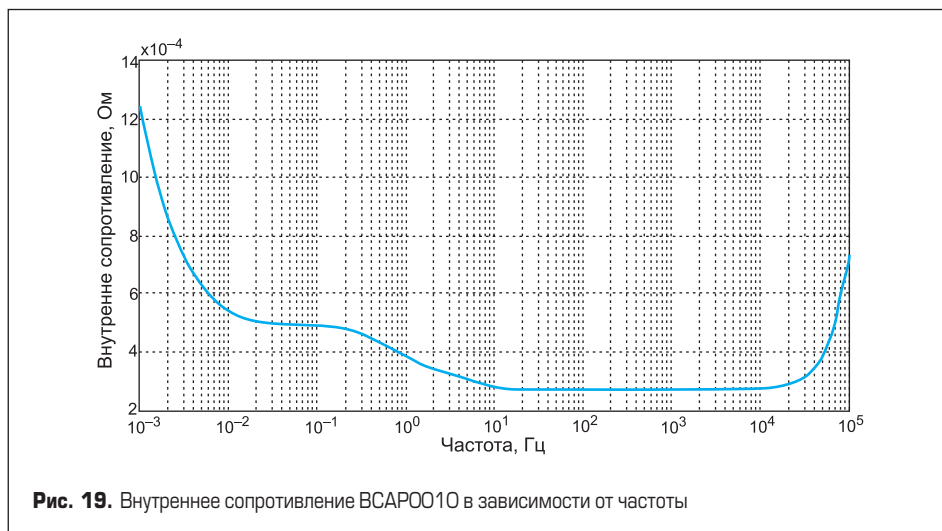
С помощью представленных параметров и эквивалентной электрической схемы суперконденсатора BCAP0010 можно определить частотные характеристики внутреннего сопротивления, реактивного сопротивления и емкости. Полученные результаты показаны на рис. 19–21 соответственно.

Согласно рис. 19, на частотах 1–10 МГц внутренний импеданс состоит из параллельного резистора утечки и сопротивления проводников ( $R_L + R_e$ ). Между 10 МГц и 10 Гц он включает сопротивление проводника  $R_e$  и ионное сопротивление электролита  $R_i$ . Этим объясняется зависимость значения ESR от температуры, поскольку параметр  $R_i$  также является термозависимым. В диапазоне от 10 Гц до 1 кГц импеданс состоит в основном из сопротивления проводника  $R_e$ . Как правило, на частоте 1 кГц производители суперконденсаторов нормируют величину высокочастотного АС сопротивления. После 1 кГц импеданс суперконденсатора начинает возрастать за счет паразитной индуктивности [35].

Как видно на рис. 20, BCAP0010 имеет резонансную частоту около 60 Гц. Ниже резонанса поведение суперконденсатора в большей степени емкостное, а на более высоких частотах — индуктивное. Если известны величины индуктивности  $L$  и реактивного сопротивле-

Таблица 2. Параметры эквивалентной модели суперконденсатора

$C_V, K_V$	Параметры моделируют зависимость емкости суперконденсатора, которая является функцией напряжения: $C = C_0 + K_V U$ (экспериментальное соотношение). $C_V$ — емкостная составляющая, зависящая от напряжения, $U_{DC}$ — напряжение ячейки.
$C_R, C_a$	Постоянные составляющие емкости суперконденсатора, формируют часть $C_0$ .
$R_V$	Постоянное сопротивление, эквивалентное последовательному сопротивлению цепи DC. Цепочка $R_V/C_V$ находится за основной емкостью $C_V$ , таким образом, эти элементы являются активными только в диапазоне низких частот.
$R_i, C_i$	$R_i$ — термозависимое сопротивление, $C_i$ используется для его блокирования в высокочастотном диапазоне. Эти параметры учитывают температурную зависимость ионного сопротивления электролита в диапазоне низких частот.
$R_e, L$	$R_e$ — активное сопротивление проводников, $L$ — паразитная индуктивность суперконденсатора.
$R_U, R_{P2}, C_{P2}, R_{P1}, C_{P1}$	Эти параметры описывают ток утечки и внутреннее перераспределение заряда.





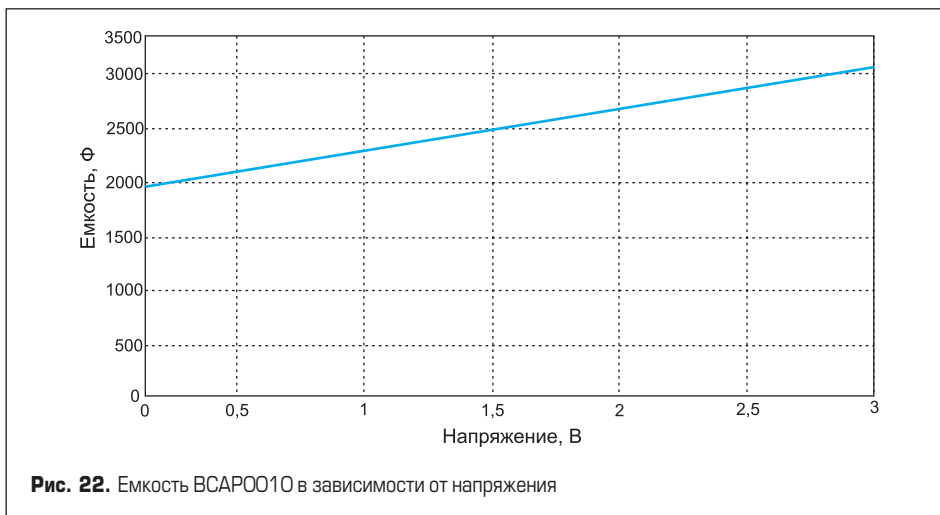


Рис. 22. Емкость ВСАР0010 в зависимости от напряжения

ния  $X$ , емкость можно рассчитать, используя выражение [35]:

$$C = \frac{1}{2\pi f(2\pi fL - X)}$$

Это уравнение позволяет определить частотную зависимость емкости, показанную на рис. 21.

Согласно рис. 21 емкость имеет ярко выраженную частотную зависимость, она максимальна на низкой частоте и резко снижается при ее увеличении. Это объясняется тем, что ионам нужно время, чтобы достичь поверхности электрода [30]. С ростом частоты ионы не успевают следовать за приложенным электрическим полем, что приводит к стремительному падению емкости [35], которая также зависит от напряжения. Данную зависимость можно смоделировать с помощью выражения  $C = C_0 + 2K_v U$ , где  $C_0$  — постоянная часть емкости, а  $K_v$  отображает скорость ее изменения в зависимости от напряжения  $U$ . Коэффициент 2 связан с тем, что уравнение отображает дифференциальное значение. Используя формулу и данные значений, мы получаем кривую (рис. 22), показывающую зависимость емкости на частоте 1 МГц от напряжения [35].

Запасенная в конденсаторе энергия определяется по формуле  $E = CU^2/2$ , однако в отношении суперконденсатора это выражение дает ошибочный результат, если считать емкость постоянной. Например, предположим, что ячейка ВСАР0010 сначала заряжается до номинального напряжения 2,5 В, а затем разряжается наполовину (до 1,25 В). Параметр SoC определяется как процент оставшейся энергии, деленный на величину полного заряда. Если использовать постоянное значение емкости при напряжении 2,5 В:

$$SoC = 100\% - (E_{1,25V}/E_{2,5V}) \times 100\% = 25\%.$$

Таким образом, суперконденсатор реализует 75% своей энергии и только 25% остается. При правильном выборе емкости в соответствии с напряжением получим:

$$SoC = 100\% - \frac{E_{1,25V}}{E_{2,5V}} \times 100\% = 100\% - \frac{0,5 \times 2935F \times 2,5V^2 - 0,5 \times 2448F \times 1,25V^2}{0,5 \times 2935F \times 2,5V^2} \times 100\% = 20,85\%.$$

То есть на самом деле корректная величина SoC — 20,85%. Сравнение значения, соответствующего идеальной емкости, и значения, рассчитанного с учетом ее вариации, показывает, что разница составляет почти 20%. Для вычисления точной величины параметра SoC необходимо учитывать изменение емкости в зависимости от напряжения.

### Пульсации на частоте коммутации конвертера

Как обсуждалось ранее, эквивалентное последовательное сопротивление (ESR) суперконденсатора выше, чем у традиционного конденсатора. Емкость также зависит от частоты — при ее уменьшении она стремится к нулю. Суперконденсатор приобретает индуктивный характер на частотах коммутации DC/DC-преобразователей, это приводит к тому, что у него снижается способность по подавлению пульсаций напряжения и растет уровень электромагнитных помех. С другой стороны, любой пульсирующий ток, протекающий через суперконденсатор, создает дополнительные потери мощности на ESR, что приводит к увеличению температуры.

Перегрев крайне негативно влияет на ресурс суперконденсаторов, например повышение температуры всего на 10 °C снижает срок службы вдвое [36]. Таким образом, уровень пульсаций входного тока, вызванных работой преобразователя, должен быть тщательно проанализирован с точки зрения надежности суперконденсатора. Решение данной проблемы предложено в [36]. В то же время необходимо учитывать ограниченные возможности суперконденсаторов по ослаблению пульсаций напряжения. Динамические свойства суперконденсатора должны быть проанализированы в отношении двух указанных проблем.

24. Linden D., Reddy T. B. Handbook of Batteries (3 Edition). McGraw-Hill, 2002.
25. Patil P. G. ANL/ESD/08-1. Developments in lithium-ion battery technology in the Peoples Republic of China. Argonne National Laboratory, IL (USA), 2008.
26. Dürr M., Cruden A., Gair S., McDonald J. R. Dynamic model of a lead acid battery for use in a domestic fuel cell system. Journal of Power Sources 2006, 10/27, Vol. 161, No. 2. ISSN 0378-7753. doi: DOI: 10.1016/j.jpowsour.2005.12.075.
27. Tenno A., Tenno R., Suntio T. Battery impedance and its relationship to battery characteristics. Telecommunications Energy Conference, 2002. INTELEC. 24th Annual International. 2002.
28. Ruddell A. J., Dutton A. G., Wenzl H., Ropeter C., Sauer D. U., Merten J., Orfanogiannis C., Twidell J. W., Vezin P. Analysis of battery current microcycles in autonomous renewable energy systems. Journal of Power Sources 2002, 11/14, Vol. 112, No. 2. ISSN 0378-7753. doi: DOI: 10.1016/S0378-7753(02)00457-3.
29. Schindall J. The Charge of the Ultra-Capacitors. IEEE spectrum November 2007.
30. [www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/ultracapacitors.html](http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/ultracapacitors.html) [2010, 5/4]
31. [www.maxwell.com/ultracapacitors/datasheets/DATASHEET\\_48V\\_series\\_1009365.pdf](http://www.maxwell.com/ultracapacitors/datasheets/DATASHEET_48V_series_1009365.pdf) [2010, 5/5].
32. Maxwell Technologies Datasheet, K2 Series 650F — 3,000F Ultracapacitors. Maxwell Technologies, 86.
33. Maxwell Technologies Cell Balancing in Low Duty Cycle Applications.
34. Maxwell Technologies Maxwell Active Cell Voltage Management Electronics. 2007.
35. Rafik F., Gualous H., Gallay R., Crausaz A., Berthon A. Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling. Journal of Power Sources 2007, 3/20, Vol. 165, No. 2. ISSN 0378-7753. doi: DOI: 10.1016/j.jpowsour.2006.12.021.
36. Basu S., Undeland T. M. Voltage and current ripple considerations for improving lifetime of Ultra-Capacitors used for energy buffer applications at converter inputs. Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE. 2010.
37. Yu, X., Starke, M.R., Tolbert, L.M. & Ozpineci, B. Fuel cell power conditioning for electric power applications: a summary. Electric Power Applications, IET 2007, Vol. 1, No. 5. ISSN 1751-8660.
38. Thounthong P., Sethakul P., Rael S., Davat B. Modeling and control of a fuel cell current control loop of a 4-phase interleaved step-up converter for DC distributed system. Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE. 2008.