

Суперконденсаторы Murata: большая емкость при малых габаритах

Владимир РЕНТЮК
rvk.modul@gmail.com

В статье рассматриваются основные конструктивные отличия двухслойных электрических конденсаторов от обычных электролитических конденсаторов, особенности их применения, а также самые современные решения в этой области, предлагаемые компанией Murata в виде суперконденсаторов серии DM.

Первоначально конденсаторы были предназначены для накопления энергии, что и обусловило впоследствии название этих устройств (от лат. *condensatio* — «накопление»). Функция накопления и отдачи энергии остается по-прежнему как никогда востребованной и актуальной, особенно после изобретения конденсаторов с двойным слоем на пористых угольных электродах. К таким конденсаторам с высокой удельной плотностью заряда, емкость которых может превышать тысячи фарад, применяется их некогда торговое название «суперконденсатор». Первый такой конденсатор был запатентован в 1957 году фирмой General Electric, но широкое коммерческое использование таких устройств началось только к 70-м годам прошлого столетия.

В отличие от аккумуляторных батарей суперконденсаторы практически не ограничены по циклам заряд/разряд, не требуют сложных зарядных устройств с формированием характеристики заряда (для аккумуляторов нужна падающая вольт-амперная характеристика с ограничением тока и напряжения). Кроме того, суперконденсаторы работают в буфере, как обычные конденсаторы, в отличие от аккумуляторов они

не имеют ограничений по напряжению хранения (для аккумуляторов, как правило, еще и с термокомпенсацией) и не боятся глубокого разряда (глубокий разряд выводит аккумулятор из строя), спокойно разряжаясь хоть до нуля вольт. Применение суперконденсаторов одновременно с мало-мощными аккумуляторами или батарейками в несколько раз продлевает срок их службы [1]. Единственное жесткое условие при использовании суперконденсаторов, которое необходимо выполнять помимо обычных требований по их рабочим режимам, — это абсолютное недопущение превышения их специфицированного номинального рабочего напряжения. Причем при работе даже на уровнях, близких к этому напряжению, не говоря уже о его превышении, имеет место сильная деградация. Данное требование необходимо тщательно соблюдать при последовательном соединении таких конденсаторов, и здесь надо принимать специальные меры по их балансировке. Однако эта проблема легко решаема.

Так что же собой представляет суперконденсатор для массового применения и насколько мы продвинулись с 1957 года в области этой технологии? Правильное назва-

ние такого конденсатора — двухслойный электрический, а вернее электрохимический конденсатор (англ. EDLC — Electric double-layer capacitor). Это не обычный электролитический конденсатор. Функционально он представляет собой гибридный конденсатор и химического источника тока. Электролит (твердый или жидкий) заполняет пространство между двумя электродами (рис. 1) [2]. Суперконденсатор может быть с органическим или неорганическим электролитом, а своеобразными обкладками в этом конденсаторе служит двойной электрический слой на границе раздела электрода и электролита. Формально суперконденсатор неполярный, нанесенная на него маркировка полярности показывает полярность его начального заряда на заводе-изготовителе. В отличие от ряда электролитических конденсаторов он не требует предварительной тренировки (активирования).

В суперконденсаторах электрическое состояние, называемое «двойной электрический слой», который представляет собой пару электронов и положительных ионов или пару дырок и отрицательных ионов, формирующихся в пространстве между электродом и электролитом, работает как диэлектрик, образуя конденсатор.

Как известно, емкость конденсатора пропорциональна площади поверхности электрода. Поэтому именно использование активированного угля, имеющего достаточно большую развитую площадь поверхности для электродов, позволяет суперконденсаторам иметь довольно высокую емкость. Механизм поглощения ионов из и десорбция их в/из поверхности электрода способствует заряду и разряду суперконденсаторов. Путем подачи напряжения на электроды ионы притягиваются к поверхности электродов, и суперконденсатор заряжается. И наоборот, они отрываются от электродов при разряде суперконденсатора. Процесс заряда и разряда условно показан на рис. 2.

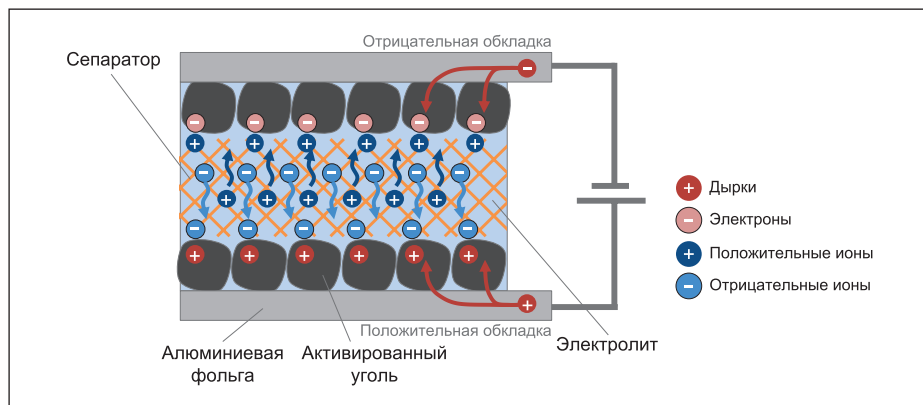


Рис. 1. Принцип работы двухслойного электрического конденсатора

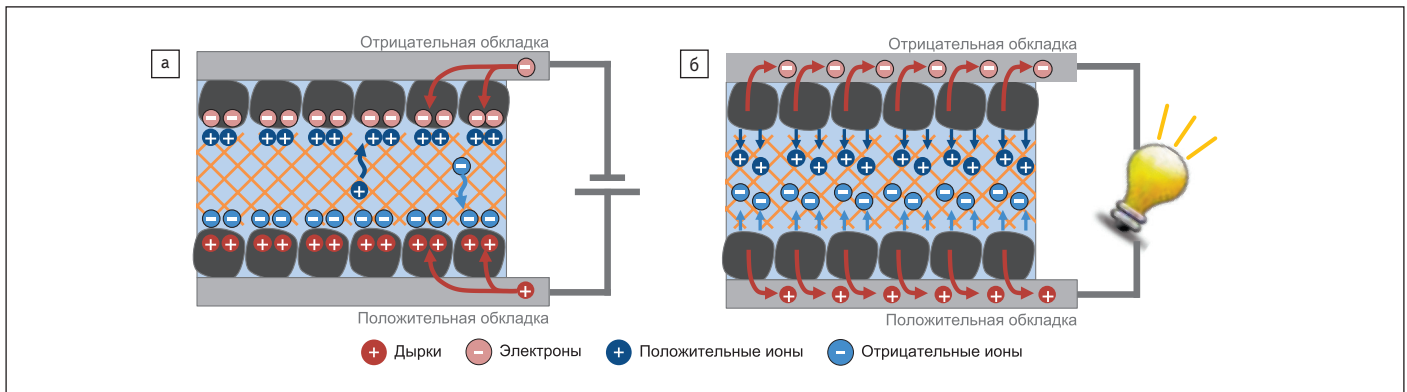


Рис. 2. Состояние двухслойного электрического конденсатора: а) заряд; б) разряд

Если речь идет об использовании суперконденсаторов в малогабаритной электронной аппаратуре, то одно из основных требований при таком применении — минимальные габариты при сохранении высокой плотности заряда и возможности отдачи заданной энергии, то есть тока. Например, для светодиодной фотовспышки или при пуске двигателя требуемый ток может достигать не то что единиц, а нескольких десятков ампер. При этом если элемент используется в устройствах с ограничением по поступлению энергии, например в тех же мотах, конденсатор должен обладать еще и малым током саморазряда. И не забываем, что нам необходимо обеспечивать питающее напряжение на уровне 5 В, а ячейка такого конденсатора ввиду его технологических особенностей имеет максимальное рабочее напряжение на уровне 2,7 В.

Всем перечисленным выше основным требованиям отвечает анонсированная компанией Murata в 2013 году и уже хорошо себя зарекомендовавшая серия двухслойных конденсаторов DM (рис. 3). В рамках этой серии компания Murata разработала компактные суперконденсаторы, отличающиеся высокой удельной емкостью и низким ESR (*англ.* ESR — equivalent series resistance, эквивалентное последовательное сопротивление). При их разработке была проведена оптимизация конструкции, материалов, а также использована новая техноло-

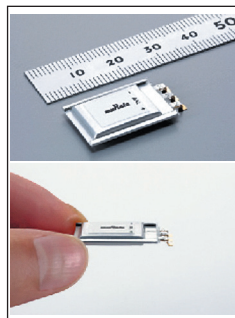


Рис. 3. Двухслойные конденсаторы серии DM компании Murata



Рис. 4. Коммерческое применение двухслойных конденсаторов серии DM

гия изготовления, которая была внедрена в 2008 году в сотрудничестве с австралийской компанией CAP-XX Ltd.

В итоге весь комплекс проведенных мероприятий позволил оптимизировать импульсные характеристики новых конденсаторов, что благодаря сочетанию высокой емкости с низким ESR в более широком диапазоне температур, чем у изделий конкурентов, расширило круг их потенциального коммерческого применения (рис. 4).

Очень важно, что, накапливая достаточно большое количество энергии и имея малые собственные потери, конденсаторы компании Murata эффективно работают не только в широком диапазоне температур, но и в широком диапазоне частот. Серия DM состоит из двух типов конденсаторов.

Конденсаторы DMT отличаются повышенной надежностью [3], а DMF — более высокими энергетическими характеристиками [4]. В 2012 году был также анонсирован выпуск конденсатора типа DMG с высокой надежностью и сверхнизким ESR, но затем от него отказались в пользу конденсаторов типа DMT и DMF, которые пока остаются основными в этой серии. Как можно видеть на рис. 3, конденсаторы серии DM в отличие от более привычных цилиндрических конденсаторов имеют оригинальную компоновку и малогабаритную сверхплоскую конструкцию (рис. 5).

Именно такая конструкция позволила им обойти многих конкурентов, особенно это касается более привычных цилиндрических суперконденсаторов. Особенности новых

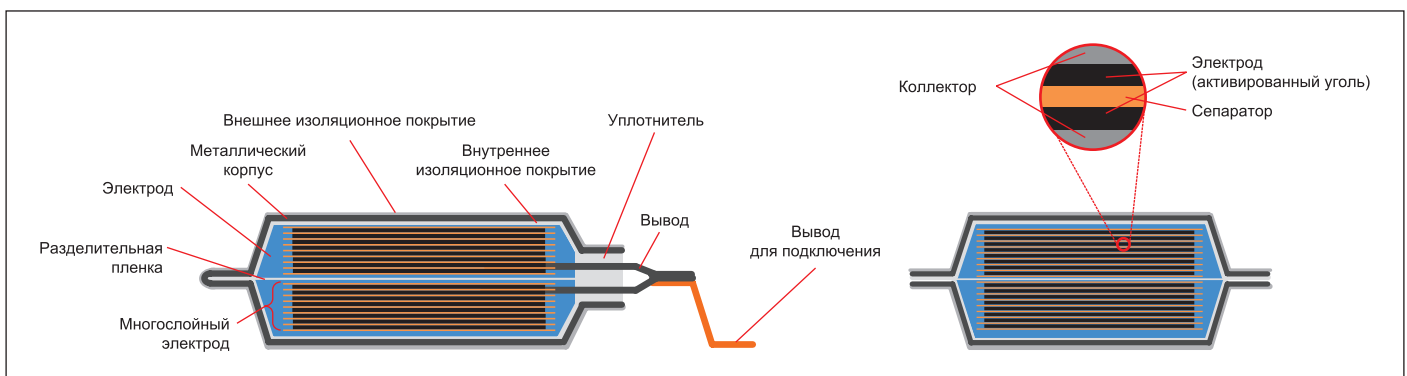
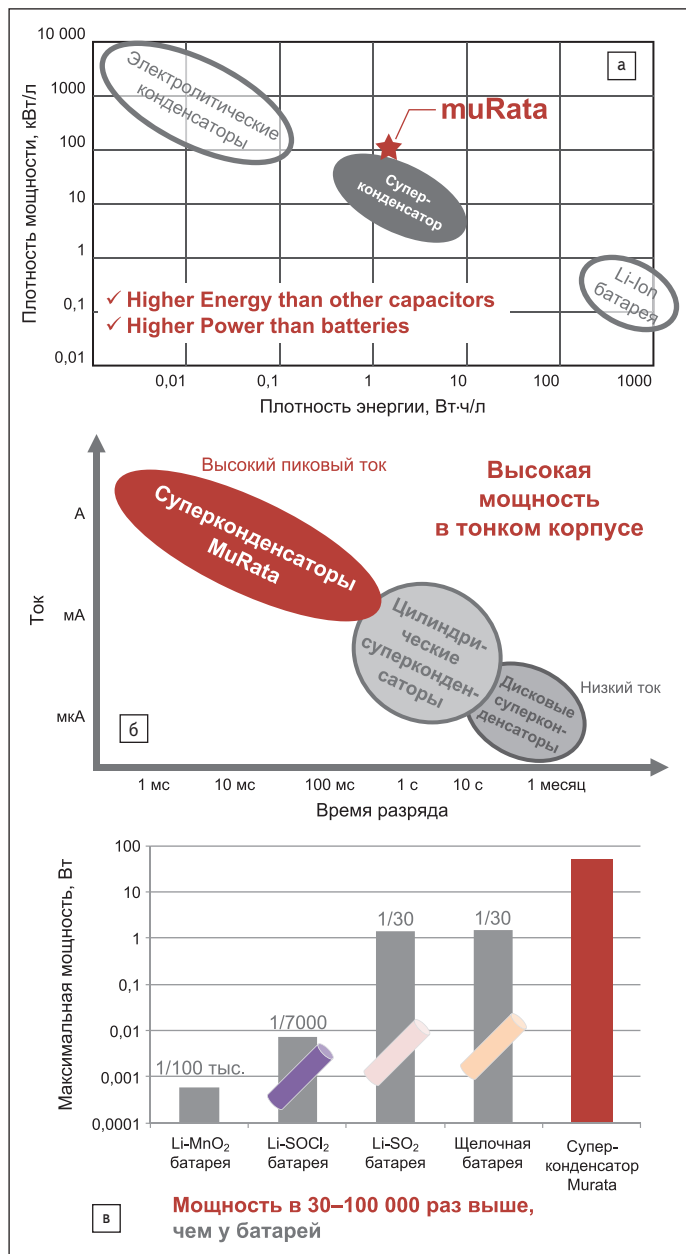


Рис. 5. Конструкция двухслойного электрического конденсатора компании Murata



предложений компании Murata ясно видны из трех презентационных графиков [2], представленных на рис. 6.

Еще одной важной особенностью рассматриваемых конденсаторов является их высокая надежность и малая временная деградация и при циклах заряд/разряд. На графиках, представленных на рис. 7, показаны типовые кривые деградации емкости и ESR конденсаторов серии DM по отношению к аналогичным по начальной емкости и ESR типовым цилиндрическим конденсаторам.

Для сравнения использовались цилиндрический суперконденсатор компании A (5 В; 0,47 Ф) и суперконденсатор Murata DMF3R5R5L334M3D (5,5 В; 0,35 Ф). Как можно видеть из представленных графиков, цилиндрический суперконденсатор имеет значительно большую деградацию. Дополнительные, важные для разработчика параметры доступных на настоящее время конденсаторов этой серии приведены в таблице, а полные их характеристики, условия применения и монтажа — в описаниях [5, 6].

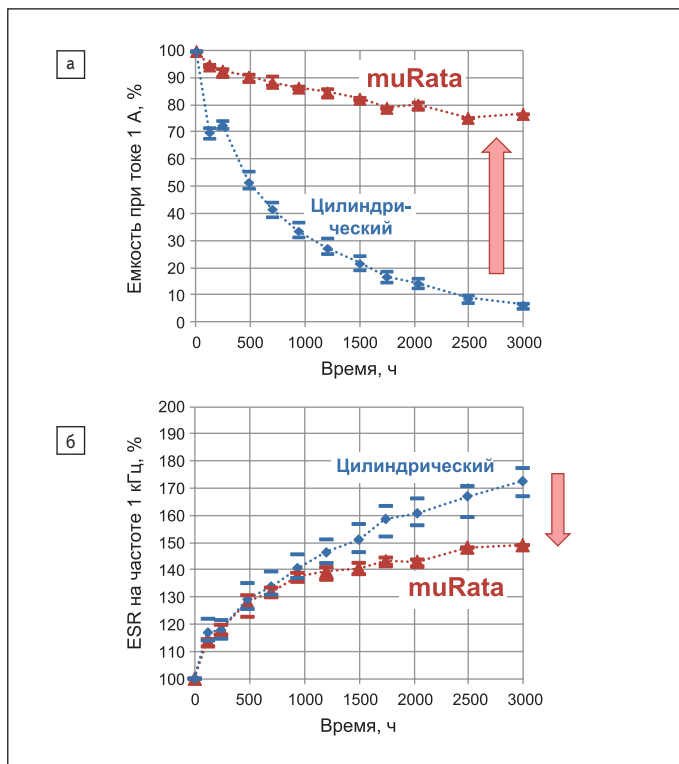


Рис. 7. Деградация параметров двухслойных электрических конденсаторов Murata в сравнении с аналогичными по начальным параметрам типовыми цилиндрическими суперконденсаторами: а) емкость; б) ESR

Таблица. Основные технические характеристики двухслойных электрических конденсаторов серии DM компании Murata

Наименование	Рабочее напряжение, В	Номинальная емкость, Ф	Тип. ESR на 1 кгЦ, мОм	Мак. ток утечки за 96 ч, мкА	Ток, А	Размеры, мм (Д×Ш×В)
DMF3Z5R5H474M3DTA0	5,5	0,47 (±20%)	45 (55 max)	5	10	21×14×3,2
DMF3Z5R5H474M3DTA0	5,5	1 (±20%)	40 (50 max)	10	10	30×14×3,7
DMT334R2S474M3DTA0	4,2	0,47 (±20%)	130		10	21×14×3,5

Обладая очень широким рабочим диапазоном температур и диапазоном допустимых токов заряда и разряда от 400 мкА·ч до 1,5 А·ч, рассмотренные конденсаторы успешно используются в системах сбора свободной энергии, а также в качестве резервного источника питания в интеллектуальных счетчиках, POS-терминалах, в UPS и т. п. Для конденсаторов типа DMT основная область применения — это системы резервного питания твердотельных накопителей SSD, они специально разработаны для данной цели, имеют повышенную надежность и более широкий диапазон рабочих температур.

Все рассматриваемые в статье конденсаторы — трехвыводные. Формально они представляют собой последовательное включение двух конденсаторов, выполненных в одном корпусе (рис. 5), с отводом от точки их внутреннего соединения. Если бы мы начали заряжать такой составной конденсатор, то, в зависимости от емкости и степени разряда одного из них, на втором конденсаторе напряжение могло бы оказаться выше максимально допустимого. В итоге — деградация и выход из строя конденсатора, а то и всего конечного изделия.

Самый простой способ — пассивная балансировка (рис. 8). Она проста и дешева, но не работает с большими токами, так как при этом потребуются резисторы малых номиналов и, следовательно, резко возрастают потери мощности.

На больших токах используется активная балансировка, ее принцип (условно) показан на рис. 9, по своей сути — это обыкновенное расщепление питания с делением его на два равных источника.

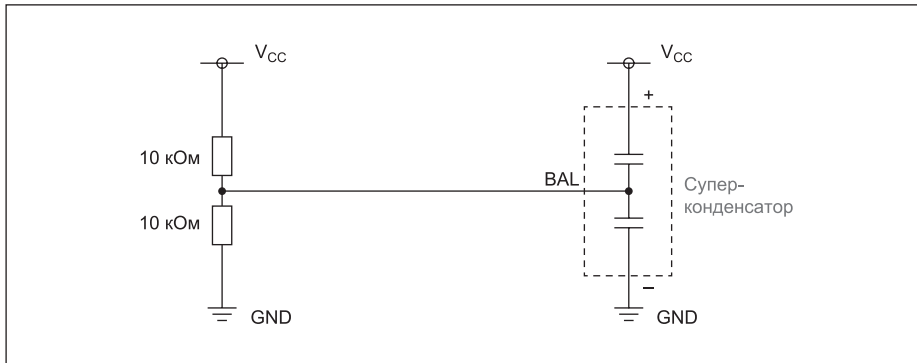


Рис. 8. Пассивная балансировка последовательно соединенных двухслойных конденсаторов

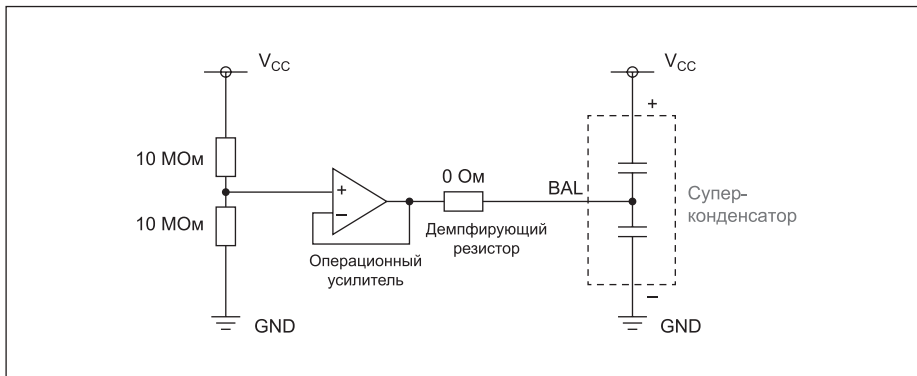


Рис. 9. Активная балансировка последовательно соединенных двухслойных конденсаторов

Однако в настоящее время существует достаточно большое число микросхем DC/DC-преобразователей, имеющих встроенные цепи и вход для балансировки суперконденсаторов. Например, контроллер LTC3330 компании Linear Technology, который описан в уже упомянутой статье [1]. Подробное рассмотрение вопроса и особенности балансировки не входит в задачи настоящей статьи, для получения более подробной информации можно обратиться к разделу 10 публикации [2].

Выполним небольшой инженерный анализ в свете рассматриваемой проблемы. В начале статьи мы отметили, что первоначальная функция конденсаторов, а именно накопление и отдача энергии, в настоящее время и востребована, и актуальна как никогда. Как известно, энергия заряженного конденсатора равна:

$$W = q^2/2C,$$

где C — это емкость конденсатора, а q — электрический заряд, который в свою очередь определяется как $q = C \times U$. Таким образом, энергия заряженного конденсатора может быть выражена следующим соотношением:

$$W = C \times U^2/2,$$

где U — это напряжение (а вернее, разность потенциалов), до которого заряжен конденсатор.

Эти известные еще из школьного учебника физики формулы приведены для того, чтобы мы вспомнили, что энергия, накопленная и отдаваемая конденсатором, зависит от двух величин — его емкости и разности потенциалов, которая определяет степень заряда, когда он принимает энергию, и разряда, когда конденсатор отдает накопленную в нем энергию. Как видно из приведенной формулы, для сохранения одинакового уровня энергии емкость конденсатора имеет квадратичную зависимость от отношения разности потенциалов:

$$C_1/C_2 = (U_1/U_2)^2.$$

То есть если мы понизим разность потенциалов с 100 до 10 В, то для сохранения требуемого уровня энергии нам необходимо будет увеличить емкость конденсатора не в 10, в 100 раз, а если мы снизим разность потенциалов до 1 В, то нам потребуется увеличить емкость конденсатора уже в 10 тыс. раз. Почему мы взяли в качестве примера разность потенциалов в 1 В? Это связано с проблемой питания низковольтной аппаратуры, для которой допустимый диапазон питающих напряжений как раз и находится в пределах от 5,5 до 4,5 В. Если нам нужно обеспечить непрерывное и гарантированное питание такого устройства током 10 мА в течение, допустим, 100 с, то конденсатор должен отдать заряд, равный:

$$q = I \times t = 0,01 \text{ А} \times 100 \text{ с} = 1 \text{ Кл.}$$

Нетрудно вычислить, что для этого нам понадобится конденсатор емкостью $C > q/\Delta U = 1 \text{ Кл}/1 \text{ В} = 1 \text{ Ф}$. Вот мы и подошли к тому, что нам потребовался суперконденсатор. Теперь, чтобы быть полностью уверенными в правильности наших расчетов, после выбора типа конденсатора необходимо сделать уточняющий пересчет по емкости уже для конкретного типа конденсатора, то есть с учетом его собственного внутреннего сопротивления ESR. В этом случае формула расчета минимальной емкости конденсатора примет вид: $C > I \times t / (\Delta U - I \times \text{ESR})$.

На предложения использовать конденсатор меньшей емкости и более высокого напряжения, чтобы увеличить ΔU , сразу ответим: да, можно. Но для этого нужно применить повышающий DC/DC-преобразователь для заряда такого конденсатора и понижающий DC/DC-преобразователь для последующего формирования нужного нам низкого напряжения. И какой объем это сооружение (другое определение и на ум не приходит) займет в нашей конструкции? И сколько оно будет стоить? И какова будет его эффективность с учетом КПД DC/DC-преобразователей? Так что этот вариант оставим авторам некогда популярных инженерных комиксов из серии «Зачем просто, когда можно сложно?».

Несомненно, более взвешенное решение — это использование химических источников тока и аккумуляторов. Но и здесь не все так гладко и просто, как оно кажется и того хочется. Батарейки нужно кому-то менять и за этим следить, аккумуляторы — надо заряжать, и они имеют ограниченное число циклов заряд/разряд. Как уже отмечалось в начале статьи, заряжать и использовать их необходимо правильно, соблюдая специальные требования. Как мы знаем, для аккумулятора и перезаряд, и глубокий разряд — недопустимы. А вот для конденсаторов с правильно выбранными рабочими характеристиками таких ограничений по заряду и разряду нет.

В заключение отметим, что для облегчения выбора конденсаторов и выполнения сопутствующих расчетов компания Murata предлагает своим клиентам полное руководство по двухслойным конденсаторам рассматриваемой в статье серии [5].

Литература

1. Drew J. Powering a Dust Mote from a Piezoelectric Transducer // LT Journal of Analog Innovation. July 2015.
2. Murata Supercapacitor (EDLC). Technical note (DMF, DMT/Version 11). 10th December 2014.
3. High Performance Supercapacitor (EDLC). DMT Series. Murata Manufacturing Co. Jul. 8, 2015.
4. High Performance Supercapacitor (EDLC). DMF Series. Murata Manufacturing Co. Mar. 20, 2015.
5. High Performance Electrical Double-Layer Capacitors DMF & DMT Series. Technical Guide. Murata Manufacturing Co. 2013.