

# Суперконденсаторы и их роль в системах питания электроники ближайшего будущего

**Если спросить у разработчиков электронного оборудования о самых важных наблюдаемых ими тенденциях его развития, их ответ будет очевидным — электроника скоро станет более интеллектуальной, многофункциональной, еще более малогабаритной и максимально экономичной в части расходования энергии. Максимально ярко эти изменения проявляются в технологии, получившей название «Интернет вещей», или IoT (Internet of Things). Ее суть — не просто связь оборудования в рамках сети, а его более «умная» работа в системе, основанная на обмене данными и аналитике на базе еще одного феномена — «больших данных», и как итог — принятие самостоятельных решений. Все это связано не только с использованием современных высокопроизводительных микроконтроллеров, но и с организацией питания такого оборудования, причем само питание должно быть энергоэффективным и бесперебойным и не требовать часто вмешательства для обслуживания путем замены химических источников тока или израсходовавших свой ресурс аккумуляторных батарей.**

Владимир РЕНТЮК  
Rvk.modul@gmail.com

Расширенная функциональность означает не только большую сложность технических решений и компонентов, заложенных в электронном оборудовании, но и более высокую потребляемую этой электроникой мощность, особенно если речь идет об устройствах, работающих в сети и осуществляющих обмен данными, — например, интеллектуальных счетчиках учета расхода ресурсов, в том числе воды и тепла, которые не имеют подключения к питающей сети и передают показания по графику или по запросу. Инженеры-разработчики и технологи прошли большой путь в этом направлении, минимизировав потребляемые ватты и уменьшив потери в динамических режимах работы. Кроме того, сокращение общего энергопотребления, когда не требуется обработка и передача данных, достигается и переводом устройства в дежурный режим или в еще менее энергозатратный режим сна. Это позволяет использовать небольшие источники питания или питать такие устройства путем сбора свободной энергии — тепла, стороннего электромагнитного излучения, вибрации, солнечной энергии и т. п.

Однако остаются некоторые функции, требующие пусть и в короткий период времени мгновенной отдачи относительно большой мощности, например в момент передачи информации по каналу беспроводной связи или включения светодиодной ИК-вспышки при фотосъемке для фиксации текущей си-

туации по команде датчика, обнаружившего несанкционированное движение в охраняемой зоне. И это далеко не все. Есть устройства, которые, имея малое собственное потребление во время функционирования, по своей природе требуют кратковременной повышенной мощности. Здесь можно отметить устройства, в чьем составе имеются небольшие электродвигатели или аудиоусилители. Сюда можно отнести и весь парк маломощной и, как правило, малогабаритной электроники, для которой критична не только сама возможность получения пиковой мощности, но и габариты и стоимость обеспечивающего такую мощность решения.

Использование в подобных устройствах для обеспечения требуемой пиковой мощности батарей оказывается неэффективным, громоздким и относительно дорогим, поэтому здесь предпочтительно иное решение проблемы пиковой нагрузки. Для того чтобы глубже понять суть проблемы, рассмотрим типичную ситуацию — проблему организации эффективного питания. Например, мы проектируем некий датчик типа «интеллектуальной пыли», который действует в составе ячеистой сети, расположен в зоне с ограниченными доступом и питается путем сбора свободной энергии или миниатюрной батареи. Это связано с тем, что с точки зрения массогабаритных ограничений мы не можем питать его от относительно мощной батареи, к тому же требующей выезда персонала для периодиче-

ской замены. Максимум, что мы можем себе позволить — маломощную дисковую литиевую батарею напряжением 3,6 В. Но в работе нашего датчика есть моменты, когда ему в течение 20 с нужен ток 30 мА, — например, датчик должен «проснуться», выполнить измерения, обработать их, сформировать пакет, отправить данные по каналу беспроводной связи и получить подтверждение и указания о дальнейших действиях, затем обновить память и перейти в режим сна до следующего цикла. Первое и единственное лежащее на поверхности решение — применить конденсатор, что мы и сделаем. Итак:

1. От буферной батареи мы имеем напряжение 3,6 В, а наш датчик остается работоспособным до напряжения 2,6 В, то есть допустимое падение напряжения на конденсаторе  $\Delta U = 1$  В.
2. Ток, который нам нужно обеспечить в течение  $t = 20$  с, равен  $I = 30$  мА.
3. Таким образом, заряд  $Q = I \cdot t = 0,030 \times 20 = 0,6$  Кл.
4. Итак, чтобы обеспечить такой заряд, потребуется конденсатор емкостью не менее  $C > Q/\Delta U = 0,6/1 = 0,6$  Ф.

Словом, в идеале мы должны учесть и влияние ESR, тогда наша формула примет следующий вид:  $C > I \cdot t / (\Delta U - I \cdot x \cdot ESR)$ , однако даже если положить  $ESR = 0,5$  Ом, при нашем токе 30 мА эта поправка не окажет заметного влияния. Но сбрасывать ее со счетов нельзя, поскольку от конденсатора в других прило-

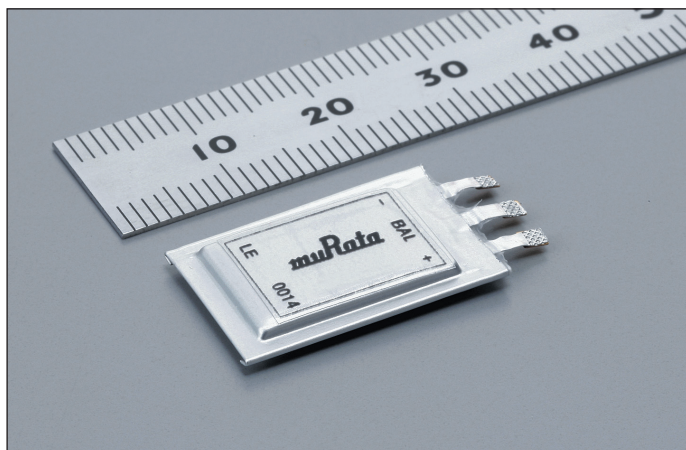


Рис. 1. Двухслойные электрические конденсаторы серий DMT и DMF компании Murata

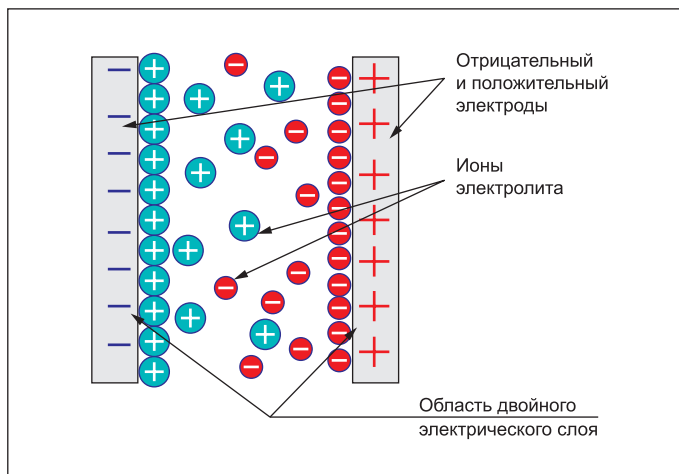


Рис. 2. Принцип работы двухслойного электрического конденсатора

жениях может потребоваться импульс тока в 1 А и более.

Разумеется, использовать обычный электролитический конденсатор в этом случае просто не реально, так как нам нужен конденсатор и большой емкости, и малых габаритов. И здесь на арене появляются суперконденсаторы, в СССР они получили название «ионисторы», что близко к их правильному названию — «двухслойный электрический конденсатор», а вернее «электрохимический конденсатор», или EDLC (Electric doublelayer capacitor). Применительно к рассматриваемой нами области одним из наиболее эффективных решений с точки зрения объема и электрической емкости являются суперконденсаторы серий DMF [4, 5] и DMT [6, 7] компании Murata (рис. 1).

Суперконденсатор — это не обычный электролитический конденсатор. Функционально он представляет собой гибрид конденсатора и химического источника тока. Электролит, твердый или жидкий, заполняет пространство между двумя электродами (рис. 2) [1].

Такой конденсатор может быть с органическим или неорганическим электролитом, а своеобразными обкладками в нем служит двойной электрический слой на границе раздела электрода и электролита. Этот слой образуется на границе раздела порошка из активированного угля и электролита. Хранение заряда происходит не вследствие химического процесса, как в батареях или аккумуляторах, а физическим движением ионов в порах в слоях углерода. Поры в активированном угле обеспечивают огромную площадь поверхности для аккумуляции заряда, что дает высокое значение емкости, превышающее 1 Ф. Что касается столь важного параметра, как эквивалентное последовательное сопротивление, или ESR (Equivalent Series Resistance), оно является вполне умеренным и обычно находится в пределах 50–500 мОм, что делает суперконденсаторы устойчивыми к коротким замыканиям.

Почему мы выбрали суперконденсаторы серий DMT и DMF? Существует несколько форм-факторов суперконденсаторов, оптимизированных для разных сфер применений: от дисковых, типа монеты, до цилиндрических и плоских. На рис. 3 они показаны в порядке возрастания их рабочих максимально допустимых пиковых токов. Суперконденсаторы серий DMT и DMF выделяются в этом ряду благодаря своим малым габаритам и конструктивному исполнению, о чем более подробно поговорим далее. Типовые сферы применения плоских многослойных суперконденсаторов серий DMT и DMF компании Murata — это приложения, где требуется большой кратковременный пиковый ток, выравнивание токовой нагрузки на батарею или маломощный источник питания, а также резервное питание при кратковременной просадке или отключении основного источника энергии.

В чем же еще преимущества суперконденсатора и каковы его слабые стороны? Начнем с сильных сторон. Во-первых, высокая емкость (у конденсаторов серии DTM — 0,22 и 0,47 Ф, а у DMF — 0,47 и 1 Ф), относительно низкое эквивалентное последовательное сопротивление ESR и собственная индуктивность. Что касается суперконденсаторов серий DMT и DMF компании Murata, то у DMT ESR находится в пределах

130–330 мОм, а у DMF всего 40–45 мОм. При этом по сравнению с батареей суперконденсатор выделяет всего около 10 Дж тепловой энергии, что не создает значительного нагрева даже в условиях короткого замыкания и сопутствующего механического стресса, приводящего к разгерметизации корпуса из-за роста внутренних напряжений [2].

Во-вторых, формально суперконденсатор — не полярный, нанесенная на него соответствующая маркировка показывает лишь полярность его начального заряда на заводе-изготовителе [1]. Это вроде бы и мелочь, но ошибка при включении, в отличие от электролитических конденсаторов, не приведет к его выходу из строя и повреждению устройства, в которое он установлен, особенно учитывая большой уровень накопленной в нем энергии и высокий выходной импульсный ток.

Уровень накопленной энергии и уровень мощности суперконденсаторов по отношению к обыкновенным электролитическим конденсаторам и аккумуляторным батареям можно оценить на примере рис. 4. Здесь плотность энергии приведена на вертикальной оси, она показывает, сколько заряда может быть накоплено и сохранено в конденсаторе или батарее, а плотность мощности, представленная на горизонтальной оси, демонстрирует, сколько электроэнергии может быть высвобождено мгновенно.

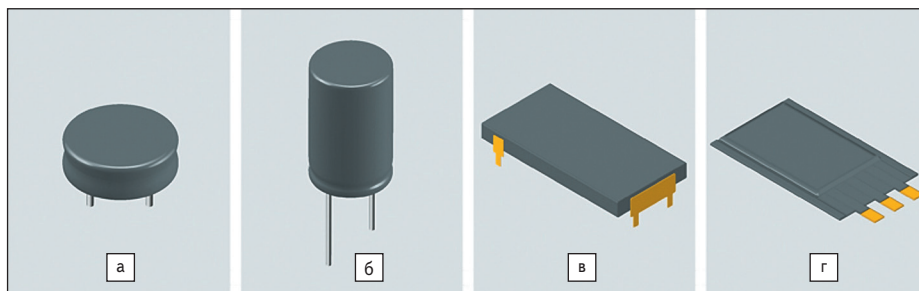


Рис. 3. Типовые варианты конструктивного исполнения суперконденсаторов: а) низкопрофильный, дисковый монетного типа; б) цилиндрического типа (бочонок); в) в металлическом корпусе; г) плоский многослойный

Батареи и аккумуляторы могут длительно хранить большой заряд, но количество энергии, которое может быть освобождено мгновенно, относительно мало. И наоборот, электролитические конденсаторы могут отдать большой заряд мгновенно, но заряд, который они могут хранить, довольно мал, даже с учетом их высоких рабочих напряжений. Возможности суперконденсаторов EDELС находятся между этими упомянутыми технологиями. То есть возможная накопленная в них энергия сравнима с другими типами конденсаторов, в то время как их мощность в большей степени сравнима с батареями и аккумуляторами [3].

Если же вести речь о мощности  $N = dE/dt$ , то есть энергии, переданной за единицу времени, то здесь у суперконденсаторов (если говорить в рамках проблемы, указанной в начале статьи, — для устройств с низковольтным питанием и в данном физическом объеме) конкурентов попросту нет. Суперконденсаторы, в том числе серий DMT и DMF, имеют гораздо более высокую плотность мощности, которая в 100 000 раз выше, чем, например, у дисковой батареи Li-MnO<sub>2</sub>. По сравнению с ней суперконденсатор выигрывает в том, что может обеспечить устройство мгновенной относительно высокой мощностью, на порядок большей, нежели близкие к нему по характеристикам батареи (рис. 5) [2]. Легко посчитать, что ток короткого замыкания у конденсатора серии DMF с его ESR 40 мОм при заряде до 5 В составит в пике 125 А!

Еще одна особенность суперконденсаторов — практически неограниченное количество циклов заряда и разряда, намного превышающее допустимое для аккумуляторных батарей. И что особенно важно — они не требуют специальных зарядных устройств со сложной зарядной характеристикой. Зарядка суперконденсаторов происходит так же быстро, как и обычных электролитических конденсаторов, от любого источника напряжения и ограничена только его допустимым выходным током.

Что касается срока службы суперконденсаторов, при соблюдении обычных в этом случае требований он довольно высок, хотя, как и для всех радиоэлементов, зависит от температуры окружающей среды и приложенного напряжения, которые, как известно, являются ускоряющими факторами его старения и деградации. Если говорить о суперконденсаторах серий DMT и DMF, то диапазон температур у DMF составляет -40...+70 °С, а у DMT -40...+85 °С с относительно малым по сравнению с обычными электролитическими конденсаторами ростом ESR при низких температурах [4, 5].

Однако у всех конденсаторов этого типа есть и слабые стороны. Во-первых, они боятся разгерметизации, а во-вторых, имеют низкий допустимый уровень рабочего напряжения. Влагостойкость обеспечивается конструкцией, для этого в многослойных плоских супер-

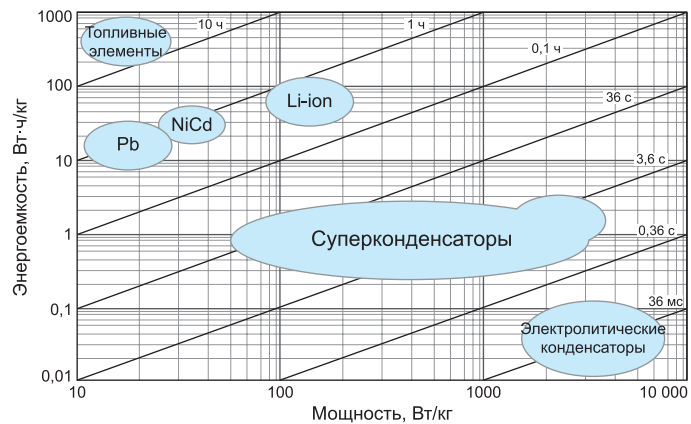


Рис. 4. Сравнение суперконденсаторов с электролитическими конденсаторами и батареями по плотности мощности и энергии

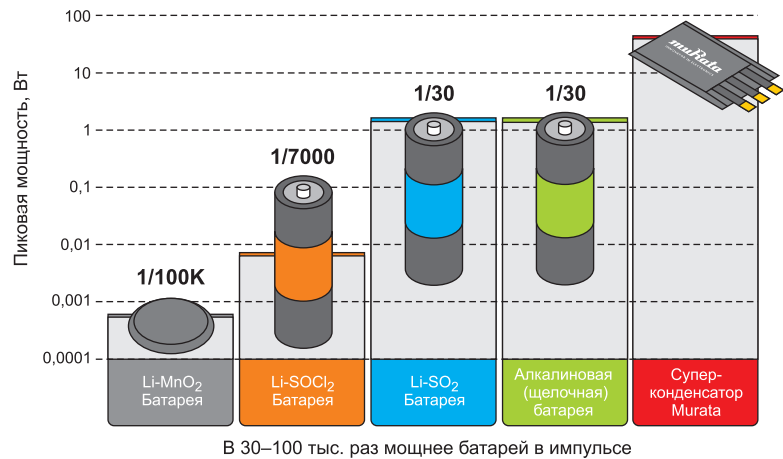


Рис. 5. Сравнение по пиковой мощности  $N = dE/dt$  суперконденсаторов Murata с батареями различных технологий

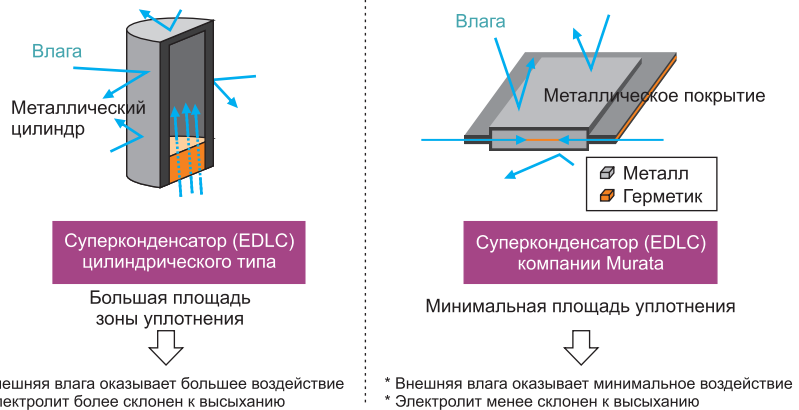


Рис. 6. Сравнение конструктивного исполнения суперконденсаторов цилиндрического типа и суперконденсаторов Murata

конденсаторах серий DMT и DMF, кроме конструктивных решений, благодаря которым достигнуты столь малые размеры, использу-

ется уплотнение не из резиновой вставки или резиноподобного герметика, а из герметизирующей смолы (рис. 6) [3].

Как уже было сказано, суперконденсаторы не поляризованные, но имеют рабочее напряжение максимум 2,7 В. Эта проблема в конденсаторах серии DMT и DMF решена таким образом, что фактически они являются двумя конденсаторами, включенными последовательно, поэтому номинальные рабочие напряжения конденсаторов DMF составляют 5,5 В, а DMT — 4,2 В.

Однако здесь необходимо учитывать, что последовательное включение всех двухслойных конденсаторов предусматривает наличие пассивной или активной схемы балансировки [3]. Но вот параллельное включение при необходимости достижения большего объема энергии достаточно просто и не нуждается в особых мерах предосторожности.

В заключение следует отметить, что значительным преимуществом конденсаторов серий DMT и DMF является ультратонкий форм-фактор вплоть до 2,2 мм, соответствующий требованиям современной карманной и носимой электроники. А сегодняшняя тенденция ее развития такова, что портативные устройства станут еще более multifunctional, compact and lightweight.

В этом смысле суперконденсаторы компании Murata представляют собой элементы, дополняющие данный тренд, и позволяют просто, без добавочных источников энергии большой мощности, решать сложные проблемы организации питания устройств с малым текущим энергопотреблением, которые для должного функционирования периодически нуждаются в больших порциях энергии. ■

### Литература

1. Рентюк В. Суперконденсаторы Murata: большая емкость при малых габаритах // Компоненты и технологии. 2015. № 10.
2. Nomura K. What role will supercapacitors play in the design of future energy systems? // [www.new-techeurope.com/2018/01/18/role-will-supercapacitors-play-design-future-energy-systems/](http://www.new-techeurope.com/2018/01/18/role-will-supercapacitors-play-design-future-energy-systems/)
3. Рентюк В. Конденсаторы и суперконденсаторы: базовые принципы, применение и преимущества // Компоненты и технологии. 2016. № 7.
4. DMF Series Murata. [www.murata.com/products/capacitor/edlc/dmf](http://www.murata.com/products/capacitor/edlc/dmf)
5. DMT Series Murata. [www.murata.com/products/capacitor/edlc/dmt](http://www.murata.com/products/capacitor/edlc/dmt)