

# Электролитические конденсаторы: традиционные или полимерные — вот в чем вопрос

Владимир РЕНТЮК  
Rvk.modul@gmail.com

**Электролитические конденсаторы — это незаменимые и широко используемые компоненты любой радиоэлектронной аппаратуры. Выбор нужного типа конденсатора кажется достаточно простой задачей, но у каждого из них есть особенности применения, которые нужно учитывать разработчику.**

Впервые эффект, положенный в основу любого электролитического конденсатора, был открыт в 1875 году французским ученым Эженом Дюкрете (Eugene Adrien Ducretet). Он исследовал этот эффект, подобный барьеру Шоттки, с помощью привычных сегодня для использования в электролитических конденсаторах металлов, таких как тантал, ниобий, алюминий, и ряда других материалов. Суть сводилась к тому, что при включении в качестве анода (положительный полюс источника питания) поверхность металлов покрывалась слоем оксида, обладающего вентильными свойствами. История собственно электролитического конденсатора началась с открытия в 1896 году принципа его работы — именно как конденсатора с изоляцией обкладок оксидным слоем, — сделанного «польским Эдисоном» Каролом Поллаком (Karol Pollak), а в 1897 году ученый впервые получил «электролитический» патент. Первый электролитический конденсатор был выполнен на основе алюминиевой фольги, использованной в качестве обкладок, и тетрабората натрия как электролита. То есть это был классический алюминиевый электролитиче-

ский конденсатор, который мы применяем до сих пор. Наибольшее распространение электролитические конденсаторы получили уже в XX веке с развитием радиотехнической, а потом и электронной промышленности.

За свою вековую историю электролитические конденсаторы стали поистине незаменимыми компонентами. Они используются для фильтрации, накопления энергии и разделения постоянной и переменной составляющей сигнала. Они настолько привычны, что на некоторые особенности их применения просто перестали обращать внимание. Но что отличает инженера-разработчика от любителя? Внимание к мелочам и ответственное отношение к решению поставленной задачи. Инженер никогда не будет следовать принципу «много не мало», а займется поиском оптимального решения. Это же касается и таких простых на первый взгляд элементов, как электролитические конденсаторы.

Как известно, изучение математики не начинают с решения дифференциальных уравнений. Так что прежде, чем мы приступим к всестороннему обсуждению алюминиевых электролитических конденсаторов, вспомним арифметику и вернемся к азам. Это поможет нам проанализировать технические основы конденсаторов в целом. Итак, что такое конденсатор? В общем случае — устройство, представленное на рис. 1.

Как видно на рис. 1, конденсатор состоит из трех основных частей. Это обкладки, или электроды (1), и диэлектрический изолирующий материал (2), который разделяет обкладки конденсатора, создавая между ними некоторое расстояние (3). Таковы три ключевых параметра, позволяющие задать столь важные характеристики, как мощность конденсатора (рабочий ток и рабочее напряжение), и варьировать емкость устройства. Как же это сделать?

Зависимость емкости конденсатора от его конструктивных характеристик следующая:

$$C = (S \times \epsilon_a) / d,$$

где  $S$  — физическая площадь поверхности обкладок конденсатора, которая не обязательно равна геометрической площади обкладок (пластин);  $d$  — физическое расстояние между обкладками;  $\epsilon_a$  — абсолютная диэлектрическая проницаемость, определяемая свойствами диэлектрического материала и равная  $\epsilon_a = \epsilon_r \times \epsilon_0$ .

Здесь  $\epsilon_r$  — это относительная диэлектрическая проницаемость среды (для краткости ее называют просто «диэлектрическая проницаемость», в некоторой технической литературе обозначается как  $\epsilon$  без индекса). Диэлектрическая проницаемость — безразмерная величина, показывающая, во сколько раз сила взаимодействия двух электрических зарядов в этой среде меньше, чем в вакууме. А  $\epsilon_0$  собственно электрическая постоянная (ранее также носила название диэлектрической постоянной), равная  $8,85 \times 10^{-12}$  Ф/м. Значение  $\epsilon_r$  вакуума равно единице, для реальных сред всегда  $\epsilon_r > 1$ .

Для того чтобы задать необходимую емкость конденсатора, можно изменить один из трех параметров:

- площадь поверхности: площадь поверхности двух проводящих пластин, составляющих конденсатор (чем больше площадь, тем больше емкость);
- диэлектрический материал: тип материала, который разделяет две пластины, называемые «диэлектрик» (чем выше диэлектрическая проницаемость диэлектрика, тем больше емкость);
- расстояние: расстояние между двумя пластинами (чем меньше расстояние, тем больше емкость).

Для интересующих нас электролитических конденсаторов основными элемента-

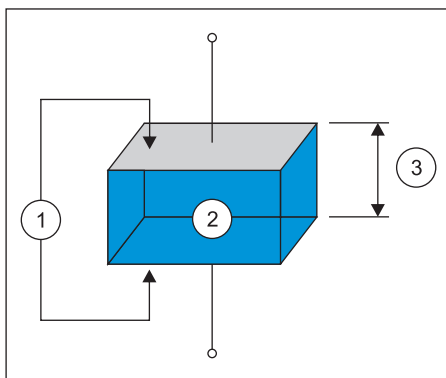


Рис. 1. Конденсатор — общее представление

ми, влияющими на их емкость, являются площадь обкладок и расстояние, определяемое толщиной диэлектрика. Большая площадь достигается технологическими усилиями: обкладки выполняются пористыми с развитой эквивалентной площадью поверхности. Это может быть спеченный в виде губки порошок, как в танталовых конденсаторах (о них мы будем говорить далее), или специальная некатаная и тоже пористая фольга, служащая основой алюминиевых электролитических конденсаторов. Одна из обкладок выполнена из металла, а вторая — сам электролит, который является катодом и имеет электрическую связь со второй вспомогательной металлической обкладкой, необходимой для заряда конденсатора и вывода накопившейся в нем энергии. Что касается разделяющего диэлектрического слоя, здесь он просто микроскопический и образуется тончайшим слоем окисла на активной поверхности анода. Именно это в совокупности позволяет получить большие номинальные емкости и одновременно становится ахиллесовой пятой всех электролитических конденсаторов, так как подразумевает не только соблюдение полярности при подключении, но и обязательное наличие поляризующего напряжения. Внимательный читатель скажет, что ведь есть и «неполярные» электрические конденсаторы. Да, есть, поскольку им все равно, какая обкладка будет анодом, они могут использоваться в цепях с неизвестной полярностью, но это не избавляет вас от обязательного наличия определенного уровня постоянного напряжения, иначе их надежность резко уменьшается. Свойства окисной пленки (ее электрическая прочность, однородность и отсутствие в ней дефектов) определяют токи утечки и устойчивость электролитических конденсаторов к перегрузкам по току и напряжению. Именно этот факт накладывает ограничения на допустимый уровень переменной составляющей по отношению к поляризующему напряжению. Причем он еще зависит и от частоты.

Приведенные выше параметры являются лишь базой. А поскольку мы имеем дело с реальным элементом, есть еще несколько важных моментов, на которые нужно обратить внимание и которые необходимо учитывать. Упрощенная эквивалентная схема реального конденсатора приведена на рис. 2.

Кроме собственно конденсатора в виде эквивалентной последовательной емкости  $C$ ,

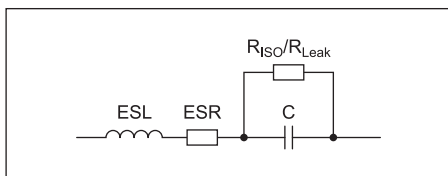


Рис. 2. Эквивалентная схема реального конденсатора

внутри данного устройства имеется несколько, скажем так, не конденсаторных компонентов, они, собственно, и определяют его эквивалентную схему, делают идеальный конденсатор реальным и ограничивают область его применения. Это:

- эквивалентная последовательная индуктивность ESL (Equivalent Series Inductance);
- эквивалентное последовательное сопротивление ESR (Equivalent series resistance);
- сопротивление изоляции  $R_{ISO}$ ;
- ток утечки, определяемый сопротивлением  $R_{LEAK}$ .

Из перечисленных составляющих именно ESR может быть наиболее критичной. Получение низкой величины ESR имеет решающее значение для повышения производительности конденсатора. Согласно известному закону Джоуля — Ленца, дающему количественную оценку теплового действия электрического тока,  $dQ = I^2 R dt$ .  $dQ$  — количество теплоты, выделяемое за промежуток времени  $dt$ ;  $I$  — ток пульсаций конденсатора, а  $R = ESR$ . Как мы видим, именно конструктивный параметр ESR вызывает выделение тепла в конденсаторе во время протекания через него тока пульсаций. В свою очередь именно тепло снижает надежность конденсаторов, вызывая усыхание электролита, если речь идет об алюминиевых электролитических конденсаторах, и их деградация из-за нарушений в изолирующем оксидном слое [1, 2]. Конечно, современный алюминиевый электролитический конденсатор — это уже совсем не тот кошмар под названием K50-6, с которым имели дело разработчики советского времени, но, тем не менее, данный факт существует, и с ним необходимо считаться. В зависимости от типа и основной области применения конденсатора значение ESR обычно задается на частоте 120 Гц или 100 кГц при +20 °С, и по вполне понятным причинам, изложенным выше, разработчику всегда желательно, чтобы значение ESR было как можно ниже.

Поскольку цель настоящей статьи не лекция о конденсаторах в общем, а конкретный разговор о новых алюминиевых электролитических конденсаторах, то остановимся на интересующих нас вопросах. Отметим только несколько важных фактов. Если рассматривать исключительно вопрос ESR, то по сравнению с традиционными алюминиевыми электролитическими конденсаторами керамические многослойные конденсаторы (MLCC), несомненно, имеют неоспоримые преимущества. Отличаясь такими низкими значениями ESR, они могут выдерживать большие токи пульсаций, а из-за малой величины ESL характеризуются и более высокой частотой собственного резонанса, следовательно, способны работать на более высоких частотах. Кроме того, уже доступны MLCC-конденсаторы достаточно высоких емкостей в десятки микрофард, а столь известные компании, как Wurth, Murata, и дру-

гие предлагают SMD-конденсатор емкостью 100 мкФ с диэлектриком X5R [6]. Словом, подобные конденсаторы нынче в моде. Но кто из нас не без греха? Так и в этом случае. И здесь он не один, а целый комплект.

Керамические SMD-конденсаторы больших емкостей изготавливаются из диэлектриков X7R, X5R и Y5V. Это сказывается на зависимости их емкости от температуры и приложенного напряжения. Чем ближе рабочее напряжение к номинальному, тем больше уменьшается их емкость, также для ряда диэлектриков характерна и временная деградация (рис. 3). Следовательно, для гарантированного получения больших емкостей, необходимых, например, для эффективной фильтрации питающего напряжения, понадобится параллельное включение большого числа данных конденсаторов. Это увеличивает габариты печатных плат, а потому здесь лучше использовать комбинацию MLCC- и электролитических конденсаторов [2]. Механические воздействия на MLCC-конденсаторы, из-за присущего у их диэлектриков пьезоэлектрического эффекта, превращают такие конденсаторы в генераторы ЭДС, а значит, в источники шумов и помех, которые могут проникнуть в сигнальные цепи. Вот почему использовать их в качестве разделительных — заманчиво, но требует известной осторожности. Еще один относительный недостаток — это их хрупкость, что особенно сильно проявляется при воздействии на них импульсов напряжения при переходных процессах, при сгибе печатных плат во время монтажа и в ходе эксплуатации. Следует учитывать зоны механического напряжения и выбирать соответствующую ориентацию конденсаторов на печатной плате. А при пайке, особенно если это делается вручную, им нужен прогрев для предотвращения термоудара. При нарушении правил применения MLCC-конденсаторы растрескиваются и ломаются, причем заметить дефект удастся далеко не сразу. Автор статьи сталкивался с подобной проблемой на практике, и, к сожалению, не один раз. И последнее. Интересующие нас MLCC-конденсаторы весьма чувствительны к влажности, перегрузкам по напряжению и не обладают эффектом самовосстановления. Печально, что при таких воздействиях конденсаторы отказывают не сразу, проблемы накапливаются, и время выхода из строя сдвигается на период эксплуатации конечного оборудования.

Но почему именно алюминиевые электролитические конденсаторы, ведь есть и другие? Давайте вкратце разберемся и в этом. Наиболее сильными конкурентами алюминиевых электролитических конденсаторов считаются танталовые. Действительно, они имеют немало преимуществ. В последние годы за счет постоянной работы ученых и технологов над проблемой увеличения эффективной поверхности спеченного танталового порошкового электрода удалось повы-

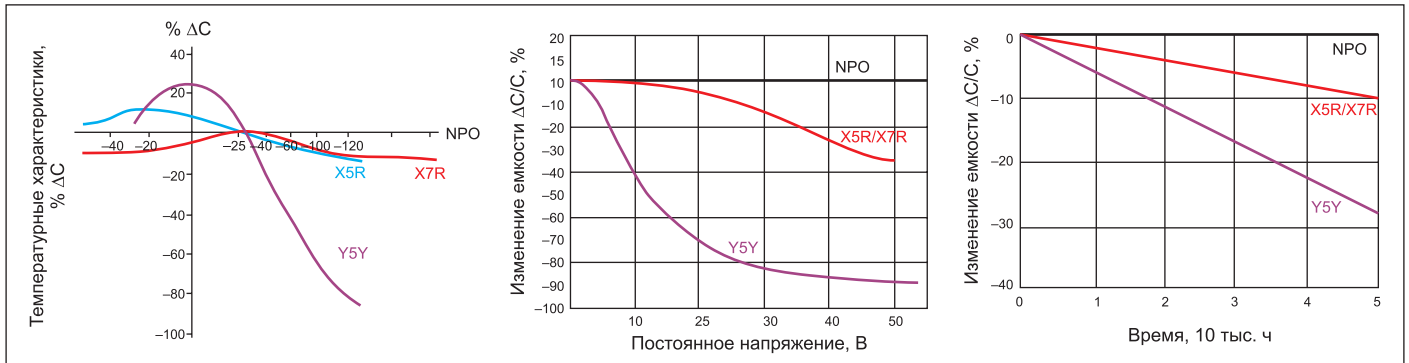


Рис. 3. Изменение емкости керамических конденсаторов с типовыми диэлектриками в зависимости от приложенного напряжения на примере конденсаторов компании Samsung [8]

сильно плотность заряда танталовых электролитических конденсаторов, и сегодня нам доступны малогабаритные конденсаторы относительно большой емкости. В результате кропотливой работы исследователей оптимизирован размер отдельных частиц и свойства порошка из тантала высокой степени очистки, а также повышено качество применяемого диэлектрика.

Танталовые конденсаторы, как правило, изготавливаются на основе аморфного пентаоксида тантала ( $Ta_2O_5$ ), а в качестве электролита обычно служит твердый диоксид марганца ( $MnO_2$ ). Использование диоксида марганца и пентаоксида тантала имеет ряд недостатков. Дело в том, что при несоблюдении требований по максимальному рабочему напряжению и токам температура внутри конденсатора повышается, вызывая деградацию структуры конденсаторов и увеличивая уровень ESR. В итоге существенно сокращается срок службы самих устройств, и даже может выйти из строя конечное оборудование. Но главная проблема — пробой диэлектрика приводит к возгоранию конденсаторов из-за того, что в некоторых танталовых конденсаторах имеется диоксид марганца. При определенных условиях может происходить пробой диэлектрика с выделением тепла, а высокое содержание кислорода, непременно присутствующего в его структуре, приводит к образованию потенциальных локальных очагов возгорания. Это тепло, в свою очередь, переводит аморфный пентаоксид тантала в кристаллическую форму, которая является хорошим проводником, со всеми вытекающими отсюда последствиями, поскольку вызывает лавинообразный процесс выделения тепла.

Следует отметить, что существуют полимерные танталовые конденсаторы, структура анода которых представляет собой симбиоз порошкового тантала и диэлектрика из пентаоксида тантала ( $Ta_2O_5$ ), «приправленного» электролитом в виде токопроводящего твердотельного полимера. У них меньшее значение ESR, они более надежны и не так пожароопасны, как конденсаторы на основе диоксида марганца. Однако пентаоксид тантала не позволяет использовать данные

конденсаторы на больших токах. Плюс к этому — относительно малая емкость, низкие рабочие напряжения и высокий ток утечки, особенно в первые минуты после включения. И не последний факт — высокая стоимость в пересчете на 1 мкФ/В. Вот факторы, которые значительно суживают область их применения. Что касается использования обычных танталовых конденсаторов в качестве разделительных, то они, по наблюдению автора статьи (полимерные автором не проверялись), явно вносили дополнительные шумы, что ограничивало их использование во входных каскадах чувствительной электронной аппаратуры. Справедливости ради надо сказать, что и алюминиевые электролитические конденсаторы старых типов, возможно из-за высоких токов утечки, также вносили заметный вклад в виде шумов типа  $1/f$ .

Здесь мы окончим сравнение в общем и обратимся к двум основным типам алюминиевых конденсаторов: традиционному электролитическому и интересующему нас новому — полимерному. Популярность алюминиевых электролитических конденсаторов кроется не столько в их техническом совершенстве, сколько в низкой стоимости, связанной с дешевизной, доступностью и простотой обработки алюминия. Для справки — сегодня стоимость конденсаторного порошка тантала 99,998%-ной чистоты составляет ни много ни мало \$800 тыс. за 1 кг. Но главный фактор — высокая достижимая емкость алюминиевых электролитических конденсаторов. Кроме того, они отличаются большими токами пульсаций и рабочими напряжениями, устойчивостью к перегрузкам. Допустима даже кратковременная переполюсовка, поскольку они имеют способность к самовосстановлению, что совершенно противопоказано танталовым. Именно это приводит к компромиссу, когда разработчик останавливает на них свой выбор. Еще одно преимущество — наличие самоэкранирования (как правило, они выпускаются в алюминиевых корпусах), что делает такие конденсаторы незаменимыми в качестве разделительных. Впрочем, проблемы из-за взрывоопасности при нарушении правил эксплуатации, относительно низкая

надежность и высокий уровень ESR портят разработчикам все удовольствие от их применения, заставляя компенсировать перечисленные недостатки уже чисто схемотехническими ухищрениями [2]. Однако в настоящее время у традиционных алюминиевых конденсаторов появилась альтернатива — полимерные алюминиевые конденсаторы. Они имеют значительно более низкое значение ESR, чем традиционные, что дает им основное преимущество, приближая к уровню танталовых, а в ряде случаев и керамических многослойных конденсаторов, при сохранении всех преимуществ традиционных алюминиевых.

Основным показателем, характеризующим электролитические конденсаторы, является электролитическая проводимость. Алюминиевый электролитический конденсатор с жидким электролитом имеет электролитическую проводимость до 0,04 См/см, а алюминиевый полимерный 4 См/см, что в 100 раз выше [3]! Разница в используемом электролите снижает значение ESR и увеличивает надежность и рабочий ток конденсатора. В таблице 1 приведено сравнение трех типов электролитических конденсаторов (по данным, приведенным в [3]), что позволит наглядно оценить преимущества повышенной электропроводности полимерного электролита.

Как можно видеть из таблицы 1, основной выигрыш алюминиевого полимерного конденсатора — снижение ESR и, следовательно, повышение тока пульсаций. Именно ток пульсации, который представляет собой компонент переменного тока, например от импульсного источника питания, считается одним из наиболее важных параметров

Таблица 1. Сравнение трех основных типов электролитических конденсаторов, используемых в современной электронной аппаратуре

	ESR, мОм	Допустимый ток пульсаций, мА
Алюминиевый электролитический	около 85	около 630
Танталовый полимерный	около 200	около 1900
Алюминиевый полимерный	около 11	около 5500

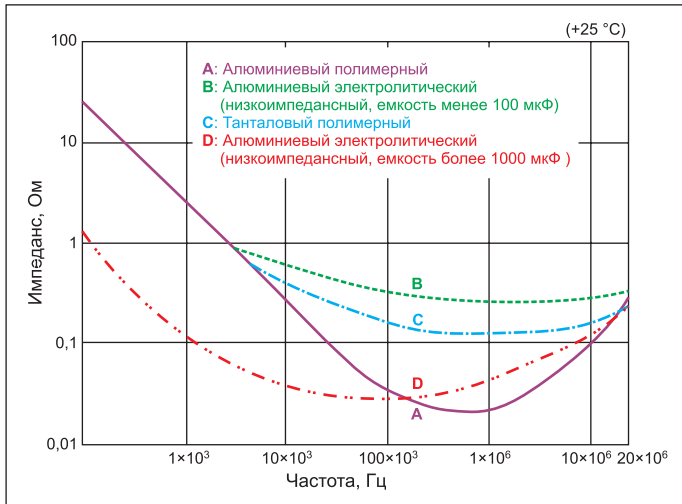


Рис. 4. Зависимость импеданса от частоты для электролитических конденсаторов [3]

конденсатора. Этот ток напрямую связан с надежностью, так как вызывает нагрев внутри конденсатора, который является основным фактором снижения срока службы данного устройства.

Поскольку проводимость полимера в 100 раз выше, чем электролита, уменьшение диэлектрических потерь приводит к снижению ESR. А чем меньше сопротивление, тем, как мы уже говорили выше, здесь, согласно закону Джоуля — Ленца, генерируется гораздо меньше тепла, что уменьшает деградацию, соответственно, такой конденсатор имеет гораздо более длительный срок службы [1].

При определении области применения конденсатора важным фактором становится не столько его ESR, сколько импеданс, то есть полное сопротивление, особенно на высоких частотах. Когда частота повышается до определенного уровня, конденсатор больше не является конденсатором и больше напоминает индуктивность. Поэтому крайне важно учитывать, на какой частоте будет он работать и насколько она близка к частоте его собственного резонанса. То есть необходимо знать, до каких пор сопротивление конденсатора будет носить истинный емкостный характер, что позволит обойтись без сложных конденсаторных сборок [2]. Здесь явное преимущество у полимерных электролитических конденсаторов, поскольку в отличие от стандартных электролитических конденсаторов на частоте 400 кГц (обычной для большинства DC/DC-преобразователей, особенно это касается изолированных) их емкость, как правило, не уменьшается. Тем не менее важен и учет ESR.

Поскольку у большинства современных конденсаторов индуктивная составляющая на их рабочих частотах ничтожно мала (особенно у танталовых) и составляет наногенри, то их импеданс определяется выражением  $Z(\omega) = ESR + jX(\omega)$ , где  $X(\omega)$  — емкостное сопротивление конденсатора. Как мы уже говорили, значение ESR алюминиевых полимерных конденсаторов намного ниже по отношению не только к обычным электролитическим, но и к танталовым конденсаторам, поэтому на высоких частотах эти конденсаторы обладают превосходными частотными характеристиками (рис. 4). Частота, на которой значение импеданса конденсатора равно ESR, то есть минимально, поскольку  $jX(\omega) = 0$ , называется частотой собственного резонанса. После этой частоты характер импеданса конденсатора меняется с емкостного на индуктивный.

Следующий важный фактор при выборе электролитического конденсатора — его диапазон рабочих температур. На первый взгляд здесь не стоит гнаться за максимально возможным диапазоном и выбирать конденсатор в зависимости от конкретного приложения. Однако не забываем, что этот параметр напрямую связан с надежностью [1, 2], и хотя само устройство может быть предназначено для работы в условиях комнатных температур, разогреть конденсатор может ток пульсаций, к тому же необходимо учитывать и возможный

нагрев от рядом стоящих элементов, например от диода или дросселя. Последнее является достаточно обычным при компактной упаковке блока питания, о чем некоторые инженеры просто забывают. Чтобы в этом убедиться, во время просмотра видео возьмите в руки блок питания от ноутбука. Ощутили? Так что, исходя из этого, может потребоваться конденсатор с куда более широким температурным диапазоном, чем условия рабочей среды конечного оборудования.

Что касается диапазона низких температур, алюминиевый полимерный конденсатор здесь также имеет преимущества, поскольку благодаря своей природе более устойчив к минусовым температурам, нежели обычные электролитические и даже керамические конденсаторы (рис. 5). В данном случае он близок к танталовым конденсаторам, но выпрыгивает у последних по ряду других параметров, о которых шла речь выше. Если говорить об обычных электролитических алюминиевых конденсаторах, снижение подвижности ионов внутри жидкого электролита приводит не только к уменьшению их емкости при низких температурах (основных типов электролитических конденсаторов, используемых в современной электронной аппаратуре), но и к увеличению ESR. Если вы ответственный разработчик (в чем автор статьи не сомневается), то рассчитывать, что в результате последующего саморазогрева все само собой «устанет», не приходится. Такой разогрев может занять достаточно длительный период, в течение которого конечное устройство может быть либо в некондиционном состоянии, либо вообще оказаться неработоспособным. Из-за повышенных пульсаций или недопустимого переходного процесса при включении оно может быть заблокировано супервизором или системой мониторинга питающих напряжений, которые являются неизменной составляющей, например, плат промышленных компьютеров [4].

Итак, в завершение статьи давайте подведем итог нашей дискуссии — почему все же предпочтителен алюминиевый полимерный конденсатор и чем обусловлены его уникальные свойства?

Нельзя сказать, что алюминиевые полимерные конденсаторы нечто сверхновое. Первые такие конденсаторы OS-CON под торговой маркой Sanyo запущены в производство компанией Panasonic еще в 1983 году [7]. Первоначально они применялись исключительно в серверах и рабочих станциях. К началу 2000-х полимерные конденсаторы уже начали использоваться в электронной аппаратуре массового спроса.

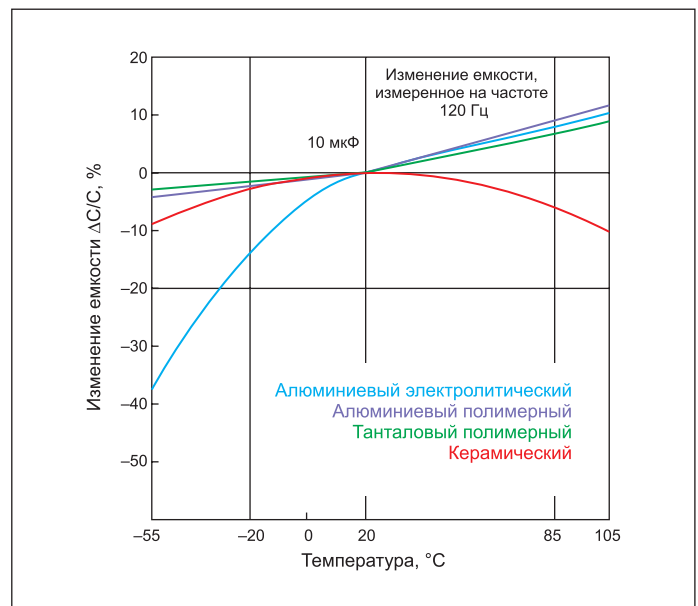


Рис. 5. Зависимость емкости от температуры для основных типов конденсаторов, используемых в современной электронной аппаратуре. Алюминиевый полимерный конденсатор показывает превосходную стабильность при низких температурах. Низкая подвижность ионов внутри жидкого электролита приводит к снижению емкости и увеличению ESR конденсатора





Но вернемся к нашему вопросу: являются ли полимерные электролитические конденсаторы лучшим вариантом для инженеров или вполне достаточно традиционных электролитических конденсаторов? Ответ зависит от решаемых задач, поскольку у каждого конденсатора есть уникальные преимущества.

Плюсы алюминиевых электролитических конденсаторов:

- Доступны более высокие номинальные значения рабочего напряжения (до 600 В).
  - Дешевле для той же емкости и напряжения.
  - Лучшее прогнозирование поведения тока утечки, чем у полимерных.
- Плюсы полимерных электролитических конденсаторов:
- Низкий ESR и более высокий допустимый ток пульсаций.
  - Отсутствие усушки (в отличие от алюминиевых конденсаторов).
  - Более высокий ожидаемый срок службы.

В конце концов, именно вам, разработчикам, решать, какой конкретный тип алюминиевого электролитического конденсатора будет выгоднее всего использовать для вашего проекта. Если нужен более дешевый вариант с более высоким рабочим напряжением, следует использовать традиционный электролитический конденсатор. Однако если вы готовы заплатить немного больше и иметь более высокие характеристики, тогда остановите свой выбор на полимерных конденсаторах, получив выигрыш по сравнению с традиционными танталовыми. Несомненно, что алюминиевые полимерные конденсаторы обеспечивают лучшую производительность в приложениях с большими импульсными токами и в аудиооборудовании.

Помочь с выбором может публикация [2], в которой на практическом примере наглядно продемонстрированы преимущества керамических, традиционных электролитических и полимерных конденсаторов. В [2] решаются сразу две важные задачи — поддержание должного функционирования самой аппаратуры и проблема обеспе-

чения электромагнитной совместимости, которой всегда уделяется самое пристальное внимание, поскольку независимо от назначения любая аппаратура подлежит в этом отношении обязательной сертификации. Кроме того, вам поможет таблица 2, в которой приведены данные по семействам алюминиевых полимерных конденсаторов хорошо известной и высоко зарекомендовавшей себя компании Würth Elektronik, в настоящее время предпринимающей эффективные шаги по выводу на рынок этой продукции, весьма интересной для разработчиков приложений самого широкого спектра. ■

## Литература

1. Рентюк В. Зависимость времени наработки на отказ электролитических конденсаторов от реальных условий их эксплуатации // Компоненты и технологии. 2014. № 7.
2. Рентюк В. Проблема оптимального выбора комбинации входных и выходных конденсаторов для подавления пульсаций и помех DC/DC-преобразователей // Компоненты и технологии. 2016. № 11, 12.
3. Introduction to Aluminum Capacitors: Traditional Electrolytic vs. Polymer. [www.we-online.com/web/en/passive\\_components\\_custom\\_magnetics/blog-pbcm/blog\\_detail\\_electronics\\_in\\_action\\_105534.php](http://www.we-online.com/web/en/passive_components_custom_magnetics/blog-pbcm/blog_detail_electronics_in_action_105534.php)
4. Рентюк В. Организация питания промышленных компьютеров от шин напряжения постоянного тока // Компоненты и технологии. 2015. № 2.
5. Menzel S. ABC of Capacitors: Basics, Characteristics and Capacitor. Würth Elektronik, Jan 15, 2015. [www.we-online.com/web/en/electronic\\_components/produkte\\_pb/fachbuecher/abckerkondensatoren.php](http://www.we-online.com/web/en/electronic_components/produkte_pb/fachbuecher/abckerkondensatoren.php)
6. WCAP-CSGP Ceramic Capacitors. [www.katalog.we-online.com/pbs/datasheet/885012108005.pdf](http://www.katalog.we-online.com/pbs/datasheet/885012108005.pdf)
7. [www.capacitorlab.com/capacitor-types-polymer/](http://www.capacitorlab.com/capacitor-types-polymer/)
8. [www.compel.ru/2013/08/19/mlcc-kondensatoryi-proizvodstva-samsung-electro-mechanics](http://www.compel.ru/2013/08/19/mlcc-kondensatoryi-proizvodstva-samsung-electro-mechanics)