

**TEAPO**

# ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ОКСИДНЫЙ КОНДЕНСАТОР ОТ TEAPO. МАЛЕНЬКИЙ ШАГ В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА, БОЛЬШОЙ СКАЧОК В НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВЕ

В 1983 году на мировом рынке традиционно известные алюминиевые оксидные конденсаторы с жидким электролитом впервые были потеснены их «младшими собратьями», изготавливаемыми по обновленной технологии. Многие производители, в том числе тайваньская фирма TEAPO [1], зародившаяся еще в 1956 году как одно из подразделений корпорации SAMPO, вместо жидкого электролита вскоре стали применять специальный токопроводящий твердотельный полимер, что позволило существенно улучшить параметры таких конденсаторов. В данной статье поясняются особенности устройства и маркировки твердотельных оксидных конденсаторов, производимых фирмой TEAPO, а также приведена их сравнительная оценка с традиционными аналогами.

## Устройство оксидных конденсаторов

Среди общеизвестных электронных компонентов наиболее простым является конденсатор, содержащий две металлические обкладки, разделенные диэлектриком. Чем больше площадь обкладок и тоньше слой диэлектрика, тем большей емкостью обладает конденсатор. Столь незамысловатый прибор незаменим практически во всех электронных устройствах, и прежде всего как фильтрующий элемент, сглаживающий пульсирующее напряжение в импульсных источниках питания. Очевидно, что для требуемой достаточно большой емкости площадь обкладок конденсатора получается весьма значительной, поэтому для уменьшения габаритов одним из немногих конструктивных решений исполнения такого элемента может быть сворачивание обкладок в компактный рулон. Такую конструкцию оксидного конденсатора иллюстрирует рис. 1.

Верхняя часть рисунка (1а) соответствует внешнему виду собранного конденсатора, а средняя (1б) – условно развернутому рулону, образованному обкладками. Здесь хорошо видно, что две алюминиевые ленточные обкладки в центре рулона соединены с выводами, на один из которых (более длинный – анод) подают положительное напряжение, на другой (катод) – отрицательное. Рулон с выводами помещен в алюминиевый корпус – стакан, в верхней части которого выводы герметизируют с помощью уплотнительного резинового диска. При свертывании в рулон отрицательная обкладка с обеих сторон оказывается отделенной от положительной

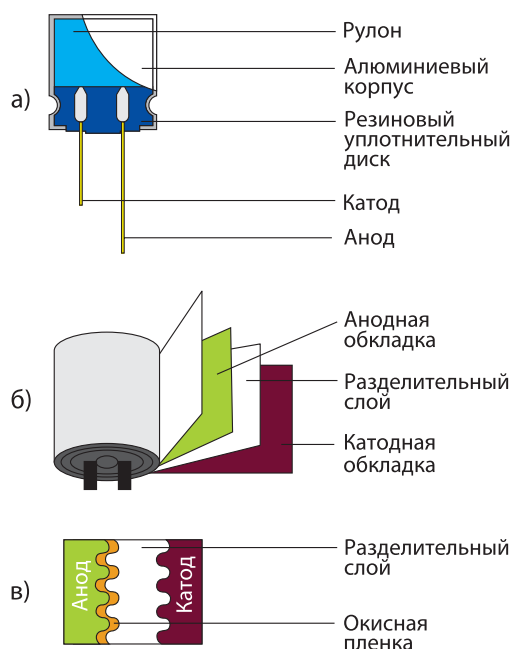


Рис. 1. Конструкция оксидного конденсатора

разделительным слоем, который в конденсаторе с жидким электролитом представляет собой пористую бумагу, пропитанную специальным токопроводящим жидким химическим составом. В твердотельном конденсаторе в качестве разделительного слоя, как упоминалось ранее, используют токопроводящий полимер. Такую конструкцию межобкладочного пространства в оксидном конденсаторе поясняет его крупноплановое сечение, показанное на рис. 1в.

Как можно убедиться, разделительный слой в данной конструкции разделяет обкладки лишь физически, а по своим электрическим свойствам он служит почти идеальным проводником. Следовательно, во избежание короткого замыкания между обкладками должен существовать еще и некий диэлектрик. Таким диэлектриком в оксидных конденсаторах с жидким электролитом служит показанная на рисунке

тонкая пленка из оксида алюминия на положительной обкладке. В полимерных конденсаторах изоляционную окисную пленку создают не на обкладке, а на поверхности токопроводящего разделительного слоя. Как в первом, так и во втором случае окисление производят электрохимическим способом. Регулируя длительность процесса окисления, получают такую толщину окисной пленки, чтобы с запасом обеспечить ее пробивное напряжение, существенно превышающее требуемое максимально допустимое рабочее для данного конденсатора.

Описанная конструктивная особенность порождает два замечательных свойства твердотельных конденсаторов, существенно повышая их качественные показатели по сравнению с аналогами. Во-первых, при возникновении электрического пробоя в последних под воздействием значительного электрического тока вскипающий электролит сопровождается бурным газовыделением, взрывом корпуса и нередко – даже повреждением других близкорасположенных на общей печатной плате элементов. Но в твердом токопроводящем полимере отсутствует как жидкая, так и газообразная фаза, поэтому и взрыв исключен.

И во-вторых, полимерные конденсаторы благодаря электротермическому воздействию электрического тока утечки при микропробоях обладают важным свойством самовосстановления, как это поясняет рис. 2.

При нормальной работе твердотельного оксидного конденсатора (рис.2а) его структура бездефектна, все элементы (анодная обкладка, токопроводящий слой и диэлектрическая окисная пленка на нем) функционируют нормально. Однако под воздействием стресса – внешнего резкого механического или термического воздействия, как и при чрезмерно быстром изменении напряжения на обкладках, в сравнительно тонкой изоляционной пленке, исчисляемой микрометрами, может возникнуть микродефект (рис. 2б). В силу ухудшения изоляционных свойств окисной пленки ток утечки между обкладками может существенно возрасти. Его протекание в таком случае приводит к электротермическому разогреву полимерного слоя (рис. 2в), и капсула расплавленного полимера «накрывает» микродефект. При дальнейшем нагреве молекулярные связи в проводящем ток полимерном сегменте вблизи микродефекта разрываются, электрическое сопротивление проводящего слоя многократно возрастает,

соответственно ток утечки резко снижается, капсула остывает, и параметры конденсатора быстро приходят в норму (рис. 2г).

Твердотельный токопроводящий полимер по своим характеристикам оказался также более жизнестойким и термостабильным по сравнению с жидким электролитом, с годами постепенно испаряющимся сквозь резиновый уплотнительный диск (рис. 1). Поэтому проводимость жидкого электролита со временем снижается, отрицательно воздействуя на основные параметры конденсатора, что подтверждено специальными исследованиями [2], проведенными в научных подразделениях компании TEAPO. О результатах этих исследований далее пойдет речь в нашей статье.

### Сравнительная характеристика оксидных конденсаторов

Для сравнительных исследований специалистами были выбраны три типа производимых компанией TEAPO конденсаторов с номинальной емкостью 470 мкФ и предельным рабочим напряжением 16 В: миниатюрный алюминиевый электролитический общего применения (Miniature Aluminum Electrolytic Capacitor) серии SK; электролитический низкоимпедансный

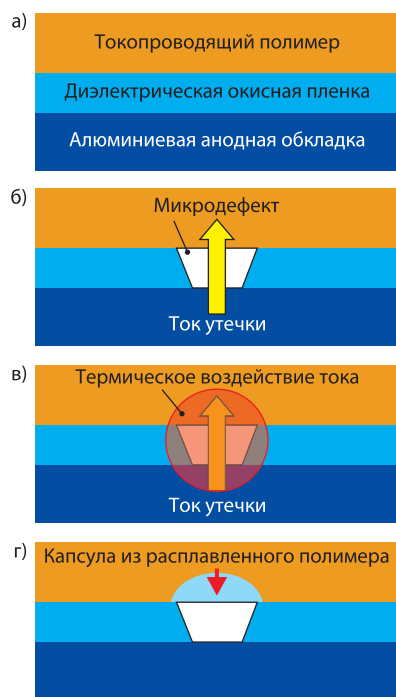


Рис. 2. Процесс самовосстановления твердотельного полимерного конденсатора

Таблица 1. Общие параметры оксидных конденсаторов, участвующих в испытании

Технические параметры	Серия конденсаторов		
	SK	TA	CG
Номинальная емкость конденсатора, мкФ	470	470	470
Максимально допустимое рабочее напряжение, В	16	16	16
Габаритные размеры (диаметр X высота, мм)	8x11,5	8x15	8x11,5
Ток утечки, мкА	≤0,01CV	≤0,01CV	≤0,2CV
Цена за шт., долл. США	0,02	0,04	0,105
Эквивалентное последовательное сопротивление (ЭПС), МОм	>200	87	11
Максимально допустимые пульсации напряжения, В	20	20	18,4
Максимально допустимые пульсации тока, эффективное значение, А	0,4	0,84	5
Термостабильность полного сопротивления в интервале -25...+25 °С	5	2	1,15
Допустимый интервал рабочей температуры, °С	-40...+85	-40...+105	-55...+105
Долговечность при максимальной допустимой температуре, ч	2000	7000	2000

с увеличенной долговечностью (Aluminum Electrolytic Low Impedance & Long Life Capacitor) серии TA; твердотельный алюминиевый с токопроводящим полимером (Conductive Polymer Aluminum Solid Capacitor) серии CG. Перечисленные конденсаторы сравнивались как между собой, так и с производимыми сторонними компаниями танталовыми конденсаторами (Tantalum Capacitor), условно обозначенными на рисунках индексом ТТ. В некоторых случаях емкость танталовых конденсаторов и сравниваемых аналогов отличалась от 470 мкФ, о чем сообщалось в исходных данных проводимых экспериментов.

Необходимо отметить, что конденсаторы серии SK производятся с наиболее широкой возможностью выбора как требуемого напряжения (6,3...500 В), так и емкости (1...22000 мкФ). Для конденсаторов серии CG этот выбор значительно меньше – 2,5...25 В и 10...2200 мкФ соответственно. Интервал рабочего напряжения и номинальной емкости низкоимпедансных долговечных конденсаторов составляет 6,3...35 В и 33...8200 мкФ. Танталовые конденсаторы производятся с допустимым рабочим напряжением 2,5...63 В и емкостью 0,1...2200 мкФ. Номинальная емкость всех конденсаторов измеряется на частоте 120 Гц при окружающей температуре 20 °С. С ростом рабочей частоты, что необходимо учитывать в проектировании ИИП, емкость конденсаторов существенно меняется, причем по-разному для различных типов.

Габаритные размеры всех отобранных для сравнительной оценки конденсаторов примерно одинаковы.

Для учета тока утечки сравниваемых аналогов в таблице приведена некоторая эмпирическая формула, одинаковая для танталовых и алюминиевых конденсаторов с жидким электролитом. Значение емкости в формулу подставляют в мкФ, а напряжения в вольтах. Если результат вычисления превышает 3 мкА, тогда в инженерных расчетах руководствуются этим предельно возможным значением. Определить ток утечки можно и практически, подавая рабочее напряжение на конденсатор не менее чем за 2 мин до измерений. У полимерного конденсатора ток утечки может быть в десятки раз больше, чем у аналогов, но не более 300 мкА.

Приведенные в таблице стоимостные показатели следует принимать как ориентировочные, поскольку они подвержены изменениям из конъюнктурных соображений. Но общая тенденция такова, что наиболее низкая цена у алюминиевых конденсаторов с жидким электролитом. Примерно вдвое выше у низкоимпедансных электролитических, и в шесть раз – у полимерных. Такое соотношение цен вполне оправдано, и мы это увидим по результатам измерений электрических параметров. Если руководствоваться только таким важным параметром, как эквивалентное последовательное сопротивление (ЭПС), и перед конструктором при проектировании импульсного источника питания стоит задача обеспечения минимальных пульсаций его выходного напряжения, то возможных решений будет два: либо применить один полимерный конденсатор, либо не менее 10 аналогичных алюминиевых с жидким электролитом. Очевидно, что второй вариант можно принять в малоответственных проектах. Там, где требуется надежность источника питания и термостабильность параметров проектируемого прибора в целом, применение твердополимерных конденсато-

ров представляется наиболее рациональным. Рассмотрим подробнее данный аспект проектирования на практических примерах.

### Влияние ЭПС конденсатора на параметры источника питания

Сравнение ЭПС твердотельного полимерного конденсатора с другими аналогами показывает, что оно минимально и составляет 11 мОм. Его измеряют на стандартной частоте 100 кГц при температуре 20 °С. ЭПС низкоимпедансного конденсатора в 8 раз больше, а для алюминиевого оно увеличивается двадцатикратно. Причем в отличие от твердотельного полимерного для выбранных аналогов ЭПС измеряют на частоте 120 Гц, что дополнительно ухудшит их показатели на рабочих частотах в десятки килогерц. Данный параметр сильно зависит от емкости конденсатора, рабочей частоты и используемых в изготовлении материалов. Более подробно данное свойство конденсаторов будет рассмотрено ниже.

Для того чтобы понять важность данного параметра, обратимся к рис. 3, где изображены схема включения конденсатора С и его эквивалентная схема замещения. На рисунке в виде отдельного резистора R отобрано ЭПС, и как отдельный дроссель L – эквивалентная последовательная индуктивность (ЭПИ). Конденсатор включен между импульсным источником питания (ИИП), преобразующим напряжение 12 В в более низкое 5 В, и некоторой нагрузкой, составленной из цифровых интегральных микросхем (ИМС).

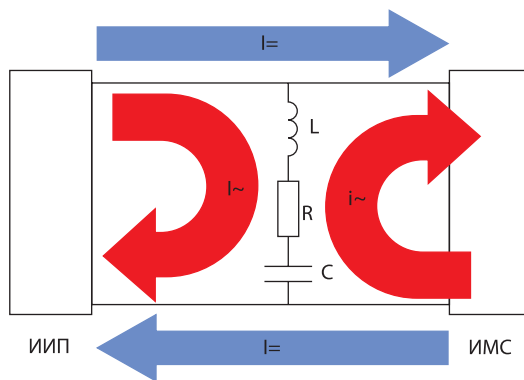


Рис. 3. Схема включения конденсатора в рабочем режиме

В работе понижающего ИИП можно наблюдать два полупериода, что сказывается на выходном напряжении ИИП, как это показано на рис. 4. На первом полупериоде происходит передача определенной порции электрической энергии в накопительный конденсатор С1 и параллельно в нагрузку ИМС, при этом пульсирующее напряжение на нагрузке и фильтрующем алюминиевом конденсаторе с жидким электролитом возрастает от 4,93 до 5,07 В (рис. 4а). На втором полупериоде выход ИИП отключен от нагрузки, и ее питание осуществляется за счет энергии, накопленной конденсатором, при этом пульсирующее напряжение снижается от 5,07 до 4,93 В. Таким образом, размах пульсаций составляет 140 мВ, в то время как средний уровень выходного напряжения, поддерживаемый системой регулирования в ИИП, соответствует требуемому значению 5 В.

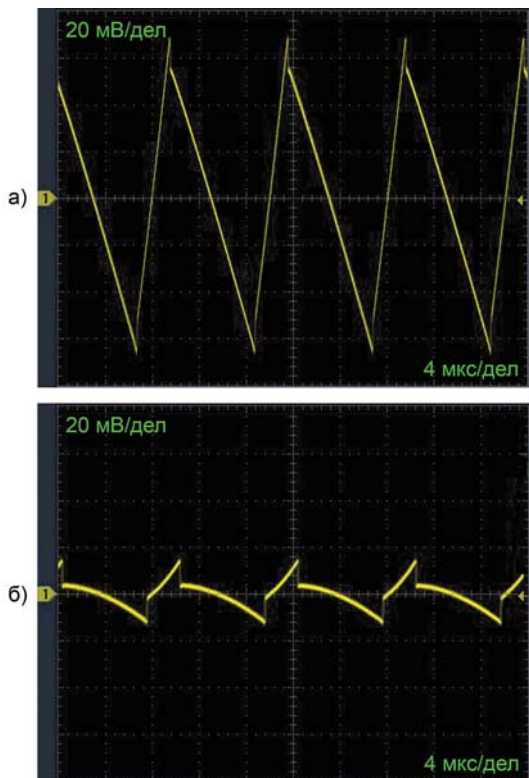


Рис. 4. Осциллограммы пульсаций выходного напряжения с разнотипными фильтрующими конденсаторами

Пульсации рабочего напряжения следует учитывать при выборе конденсатора. Запас максимально допустимого рабочего напряжения с учетом пульсаций, как показано в таблице, установлен с коэффициентом 1,15 от номинального для твердотельного полимерного конденсатора и 1,25 для остальных, что составляет 18,4 и 20 В соответственно.

На другой осциллограмме (рис. 4б) показано, как изменяются пульсации выходного напряжения, если вместо алюминиевого с жидким электролитом применить твердотельный полимерный конденсатор той же номинальной емкости 470 мкФ. Здесь отчетливо заметно, что резко снизился размах пульсаций – от 140 до 30 мВ. Такому факту можно дать простое объяснение, если обратиться к рис. 3. Поскольку ЭПС конденсатора включено параллельно нагрузке, постоянная составляющая тока  $I_{\text{ЭПС}}$  проходит к нагрузке напрямую, не ощущая наличия конденсатора. Но на пульсации, то есть переменную составляющую тока  $i_{\text{ЭПС}}$ , ЭПС оказывает шунтирующее воздействие, отводя на общий провод питания их основную часть, как показано на рисунке. Чем меньше ЭПС, тем сильнее шунтирование, что подтверждает сравнение рисунков 4а и 4б.

Необходимо заметить, что при смене фильтрующего конденсатора изменился не только размах пульсаций, но и форма. При этом примерно равными остаются очень резкие игольчатые броски напряжения. Причина их присутствия обусловлена наличием в конденсаторах ЭПИ, показанной как отдельный дроссель на рис. 3. Резкое изменение тока при его пульсации порождает на ЭПИ напряжение ЭДС самоиндукции, накладывающееся на выходное напряжение. При больших ЭПС относительный вклад игольчатых фрагментов в пульсациях напряжения малозаметен, и общая форма пульсаций носит пилообразную форму. При малых ЭПС относи-

тельный вклад ЭПИ возрастает, поэтому пульсации вместо пилообразной приобретают экспоненциальную форму. Следовательно, наблюдая за формой пульсаций выходного напряжения, можно сделать определенный вывод о влиянии на данный параметр ИИП величины ЭПС примененных конденсаторов и выбрать наилучший.

Как показано на рис. 3, пульсации высокочастотного тока порождаются не только в ИИП. Нагрузка ИМС, объединяющая в общем случае ряд цифровых устройств (коммутатор, триггер, схема совпадения, счетчик, сдвигающий регистр и пр.) является нестационарной. В ходе срабатывания отдельных элементов в ИМС также могут возникнуть значительные импульсные токи  $i_{\text{ИМС}}$ , и если ЭПС фильтрующего конденсатора будет недостаточно мало, шунтирование вторичных помех окажется неэффективным. В этом случае помеховые сигналы от ИМС смогут проникнуть на другие узлы, подключенные к общему ИИП, и вызвать отказ в работе прибора в целом. Поэтому в ответственных случаях проектирования конструктор должен осознанно выбирать фильтрующий конденсатор таким, чтобы он надежно подавлял пульсации тока как со стороны ИИП, так и со стороны нагрузки.

### Оценка влияния температуры корпуса на основные параметры конденсатора

В таблице приведены значения максимально допустимых пульсаций тока в отобранных конденсаторах, составляющие 0,4 А для алюминиевого с жидким электролитом, 0,84 А для низкоимпедансного и 5 А для твердотельного полимерного конденсатора. Здесь фигурирует эффективное значение тока. Обращает на себя внимание значительное различие данного показателя для разнотипных конденсаторов, примерно одинаковых по габаритам. И вполне обоснованно можно предположить, что в данном случае главную роль играют не габариты, а эквивалентное последовательное сопротивление, столь различающееся в зависимости от типа конденсатора и его емкости.

Если в основе ограничения напряжения на конденсаторе, содержащего пульсации, лежит опасность электрического пробоя тонкой диэлектрической окисной пленки, о чем говорилось ранее, то при ограничении пульсаций тока учитывают другой критерий, связанный с тепловым разрушением. Об отрицательном влиянии на долговечность конденсатора повышенной рабочей температуры мы поговорим несколько позже. Сейчас же лишь поясним, как учитывают и нормируют нагрев конденсатора пульсациями тока.

Известно, что при прохождении тока  $I$  через резистор сопротивлением  $R$  на нем выделяется электрическая мощность  $P$ , измеряемая в ваттах. Данное соотношение справедливо и по отношению к конденсатору, если учесть, что в качестве тока подставляют эффективное значение пульсаций тока в амперах, а эквивалентное последовательное сопротивление – в омах (чтобы мощность измерялась в ваттах), а не миллиомах, как ранее. Выделяемая на конденсаторе мощность пульсаций приводит к возрастанию температуры корпуса на  $\Delta T$  градусов, которую определяют [2] по формуле:

$$\Delta T = P R / A H$$

где  $A$  – эффективная охлаждающая поверхность конденсатора, зависящая от его типоразмера, см<sup>2</sup>;  $H$  – коэффициент теплового излучения, численно равный примерно 1,5...2 мВт/см<sup>2</sup>•°С. Как можно заключить, градиент температуры в прилежащем к конденсатору пространстве прямо

пропорционален значению ЭПС и возведенному в квадрат эффективному значению пульсаций тока и обратно пропорционален эффективной охлаждающей поверхности конденсатора.

Принято считать, что условия эксплуатации конденсатора вполне приемлемы, если разница температуры корпуса и окружающей среды не превышает 5 °С. Именно из этих соображений рассчитывают максимальное значение пульсаций тока, приведенное в таблице. Однако вполне понятно, что условия рассеяния тепла при окружающей температуре 25 и 85 °С несколько отличаются. Поэтому для учета влияния максимально допустимых пульсаций тока на нагрев конденсатора вводят дополнительный поправочный коэффициент, графическая зависимость которого от температуры представлена на рис. 5.

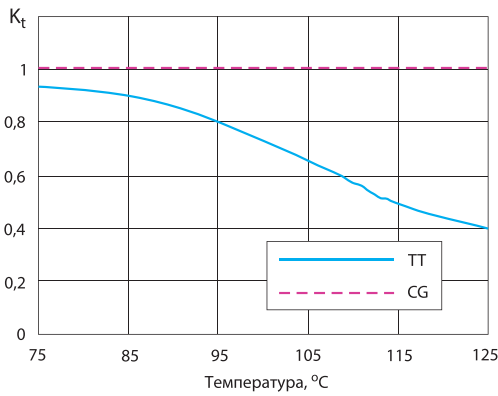


Рис. 5. Температурная зависимость корректирующего коэффициента для допустимых пульсаций тока

Предположим, несколько примененных на выходе ИИП фильтрующих конденсаторов емкостью 100 мкФ и предельным рабочим напряжением 10 В должны рассеять пульсации тока с эффективным значением 3000 мА. Температура внутри корпуса ИИП составляет 95 °С. Поскольку для полимерного конденсатора допустимые пульсации тока составляют 2320 мА, с учетом поправочного коэффициента это значение, как показано на рисунке, при повышенной температуре не изменится. Следовательно, два полимерных конденсатора с большим запасом обеспечат требуемую надежность ИИП. В случае применения аналогичных танталовых конденсаторов учитываем, что они при комнатной температуре способны рассеять пульсации тока 1149 мА, и при температуре 95 °С следует учитывать температурный коэффициент 0,9. В результате допустимые пульсации тока для них составят 1034 мА, и для нейтрализации пульсаций 3000 мА потребуется как минимум три танталовых конденсатора, что заведомо невыгодно как с надежностной, так и экономической точки зрения. Стоимость танталовых конденсаторов может быть в несколько раз больше, чем у полимерных аналогов.

Поправочный температурный коэффициент следует также учитывать при выборе максимально допустимого рабочего напряжения конденсатора, для чего служит диаграмма на рис. 6. Если, например, для питания некоторого устройства потребуется применить ИИП с выходным напряжением 10 В в условиях окружающей температуры 95 °С, в та-

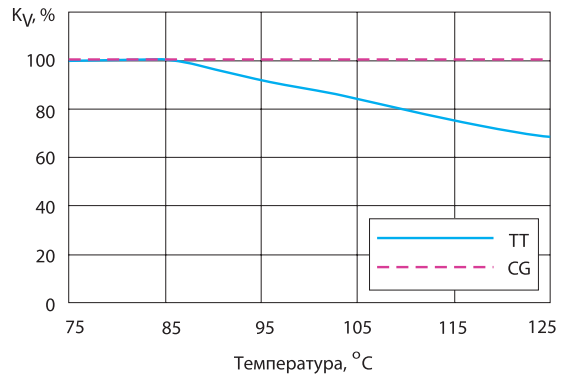


Рис. 6. Температурная зависимость корректирующего коэффициента для допустимого рабочего напряжения

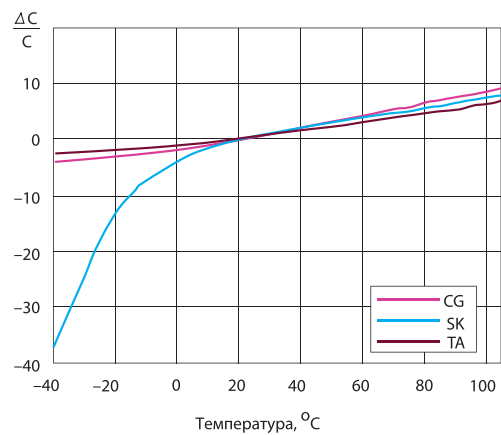


Рис. 7. Температурная зависимость относительного изменения емкости

ком случае без малейшего ущерба для надежности могут быть применены твердотельные полимерные конденсаторы с предельно допустимым рабочим напряжением 10 В, и ни в коем случае – танталовые, у которых поправочный температурный коэффициент при заданной температуре 95 °С равен 0,92, то есть допустимое напряжение снизится до значения  $10 \cdot 0,92 = 9,2$  В. Если предельное рабочее напряжение для танталовых конденсаторов при температуре 85 °С выбрать равным 16 В, то при 95 °С допустимое напряжение составит  $16 \cdot 0,92 = 14,72$  В, что вполне удовлетворяет условиям эксперимента. Однако здесь не учитывается термостабильность танталового конденсатора, о чем будет пояснено далее, поэтому в жестких условиях оправданным оказывается применение только полимерных конденсаторов.

Изменение температуры корпуса приводит также к изменению номинального значения емкости алюминиевых конденсаторов с жидким электролитом, и почти не оказывает никакого влияния на низкоимпедансный и твердотельный полимерный конденсатор, как это иллюстрирует рис. 7 для конденсаторов емкостью 15 мкФ на частоте 100 кГц. Даже при температуре -30 °С алюминиевый конденсатор уменьшает свою емкость на 25%, что делает невозможным его применение в условиях отрицательных

температур. Низкоимпедансный конденсатор по термостабильности номинальной емкости незначительно превосходит твердотельный полимерный, но выбор последнего более предпочтителен, так как он намного превосходит низкоимпедансный по термостабильности ЭПС, о чем наглядно свидетельствует рис. 8. На рисунке приведены диаграммы изменения ЭПС трех конденсаторов емкостью 15 мкФ на частоте 100 кГц. При снижении температуры корпуса от 25 до -20 °С ЭПС алюминиевого конденсатора с жидким электролитом изменяется в интервале 1,5...7 Ом (увеличивается в 4,7 раза), низкоимпедансного 0,68...0,9 Ом (увеличивается на 32%), у твердотельного полимерного не изменяется и составляет 18 мОм.

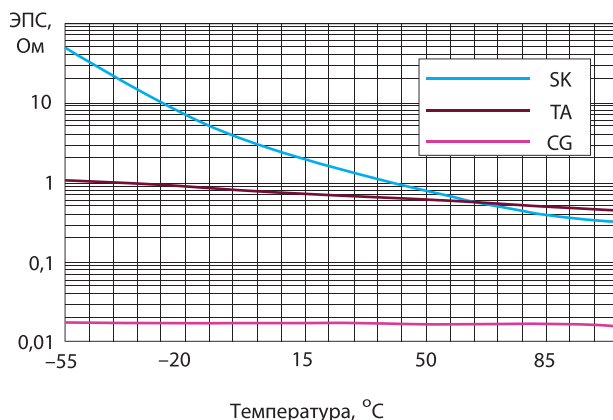


Рис. 8. Температурная зависимость эквивалентного последовательного сопротивления

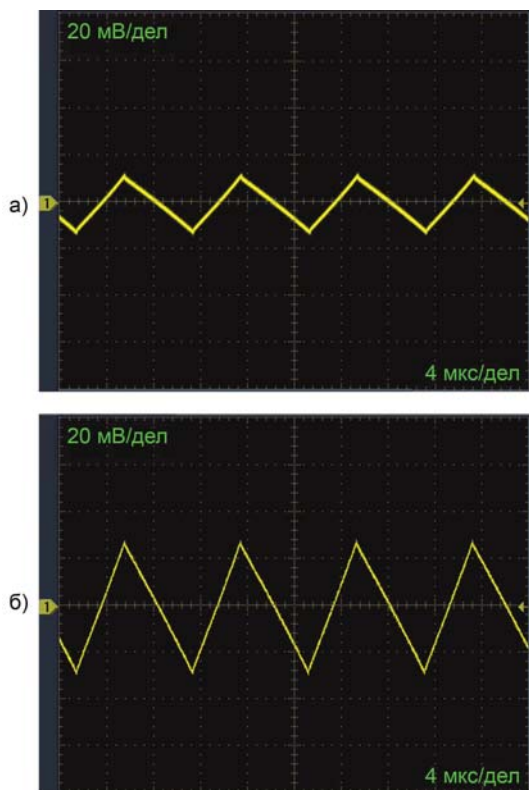


Рис. 9. Влияние температуры на пульсации напряжения в конденсаторе с жидким электролитом

Теперь обратимся к рис. 3, и повторим измерения с твердотельным полимерным конденсатором емкостью 470 мкФ и предельным рабочим напряжением 16 В. Результат данного измерения повторяет полученный ранее (рис. 4б). Подчеркнем, что данные измерения проведены при комнатной температуре 25 °С. На следующем этапе исследований за счет внешнего охлаждения снизим температуру конденсатора до -20 °С, и отметим, что при этом размах пульсаций остается прежним. Попробуем вместо полимерного конденсатора применить три алюминиевых конденсатора с жидким электролитом емкостью 470 мкФ, соединенных параллельно. При комнатной температуре пульсации напряжения иллюстрирует рис. 9а. Снова охладим конденсаторы (рис. 9б), и, как видим, размах пульсаций возрастает более чем в 2 раза. На основании проведенных измерений можно сделать вывод: применение вместо одного полимерного нескольких конденсаторов с жидким электролитом позволяет получить соизмеримо малые пульсации напряжения, однако при отрицательных температурах они недопустимо возрастают за счет изменения емкости и ЭПС последних, что исключает их использование в ответственных проектах.

Рассмотренный выше подробный учет влияния температуры на параметры конденсаторов подтверждает, что наиболее термостабильным среди них является твердотельный полимерный. Однако при этом влияние частоты затрагивалось лишь косвенно, поэтому более подробно остановимся на частотной стабильности параметров.

### Влияние частоты на параметры конденсаторов

На рис. 3 представлена общепринятая схема замещения конденсатора, включающая в себя электрическую емкость, ЭПС и ЭПИ. Потребность реального учета ЭПС и ЭПИ в конденсаторах возникла после того, как схемотехническое построение источников питания (ИП) как в промышленной, так и бытовой электронике претерпело качественный скачок. Используемые ранее низкочастотные ИП с трансформаторами, работающими на частоте 50 Гц, за какое-то десятилетие почти повсеместно были вытеснены ИИП благодаря их более совершенным массогабаритным показателям и более высокому КПД. Однако при этом принцип импульсного преобразования энергии на частотах в десятки килогерц предполагал, что рабочие частоты фильтрующих конденсаторов должны существенно возрасти, поскольку спектральные составляющие таких коммутирующих импульсов размещаются в диапазоне сотен килогерц – единиц мегагерц.

Для этого потребовалось учитывать полное сопротивление конденсатора  $Z$ , характер изменения которого с частотой  $f$  определяют емкостная составляющая  $X_C = 1/2\pi fC$  и индуктивная  $X_L = 2\pi fL$ , как это изображено на рис. 10. Поскольку емкостное сопротивление конденсатора обратно пропорционально частоте, с ростом частоты оно уменьшается. Индуктивное, прямо пропорциональное частоте, наоборот – возрастает. Существует также некоторая резонансная частота  $f_{рез}$ , на которой емкостная составляющая сопротивления по модулю уравнивается с индуктивной. Явлением резонанса обусловлен характер изменения модуля полного сопротивления, включающего в себя геометрическую сумму всех компонентов – активного  $R = \text{ЭПС}$  и реактивных  $X_L, X_C$ :

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Геометрическое суммирование можно выполнить на рисунке сложением отдельных графических компонентов

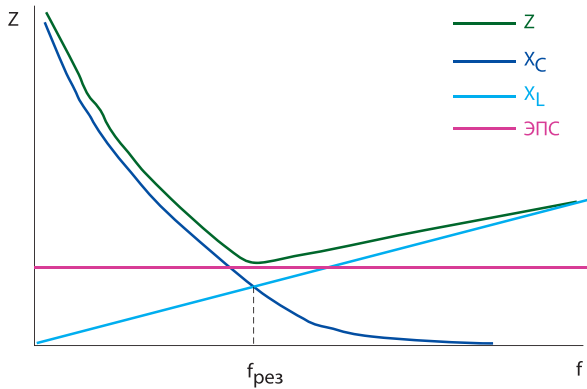


Рис. 10. Качественная характеристика частотной зависимости полного сопротивления конденсатора

и убедиться, что модуль полного сопротивления вначале монотонно уменьшается, затем стабилизируется на уровне, близком к эквивалентному последовательному сопротивлению, после чего начинает расти.

Подставив в вышеприведенную формулу параметры сравниваемых низкоимпедансного и полимерного конденсаторов, можно получить диаграмму изменения модуля их полного сопротивления, приведенную на рис. 11. Но это, если можно так выразиться, «теоретический продукт», не учитывающий,

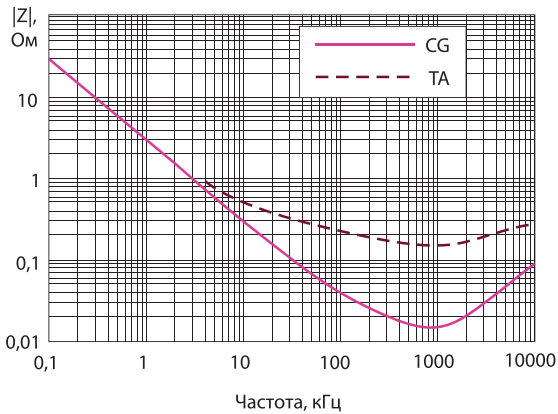


Рис. 11. Влияние температуры на полное сопротивление танталового и полимерного конденсатора

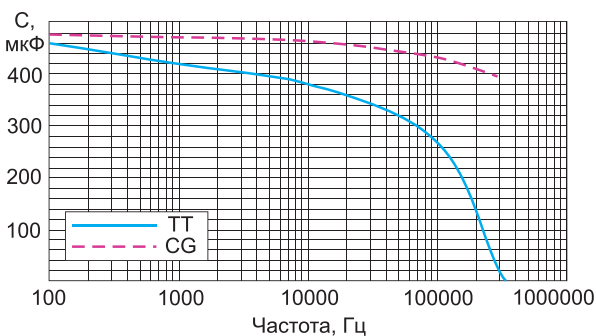


Рис. 12. Частотная зависимость емкости танталового и полимерного конденсатора

что емкость конденсаторов с изменением частоты отнюдь не стабильна. На практике эта зависимость весьма сильная, особенно для танталового конденсатора, как это иллюстрирует рис. 12. Алюминиевые конденсаторы с жидким электролитом, уступающие танталовым по своим параметрам, рассматривать в данном аспекте не имеет смысла. Сравнивая графики для полимерных и танталовых конденсаторов, видим, что на частоте 1 кГц емкость танталового конденсатора снижается почти на 13%, на 10 кГц – на 27%, и когда частота достигает 100 кГц – уменьшается в 2 раза! Можно ли такой конденсатор применять в ответственных проектах? Ответ вполне ожидаемый.

При тех же условиях твердотельный полимерный конденсатор свою емкость почти не меняет и имеет неоспоримое преимущество перед аналогами как по частотной стабильности своих параметров, так и температурной, о чем шла речь в предыдущем разделе статьи. Но при этом никак не был затронут вопрос о влиянии температуры на долговечность конденсаторов. Рассмотрим его особо.

### Влияние температуры на долговечность конденсаторов

Как установлено многолетними исследованиями, на долговечность оксидных конденсаторов определяющее влияние оказывает температура корпуса, которая зависит как от температуры окружающего воздуха (внешней теплоты), так и теплоты, порождаемой внутри конденсатора (внутренней теплоты). Внешняя теплота вызывает ускоренную деградацию образующих конденсатор элементов (рис. 1) – резинового уплотнительного диска, электролита, алюминиевых обкладок, а также испарение электролита, как упоминалось ранее. Эти разрушительные процессы ускоряются внутренней теплотой, основным источником которой является подробно рассмотренное в предыдущем разделе рассеяние на ЭПС конденсатора пульсаций тока. Именно так создается некий порочный круг отрицательных, взаимно ускоряющих друг друга процессов: тепло порождает ухудшение параметров конденсатора, ухудшение параметров приводит к возрастанию температуры конденсатора.

Скорость протекания деградационных процессов в твердотельном полимерном конденсаторе гораздо меньше, чем в конденсаторах с жидким электролитом, поскольку стойкость полимера несравненно выше. Выполним расчет долговечности конденсаторов в зависимости от условий эксплуатации с помощью табличного процессора Excel на основе вспомогательных материалов от специалистов фирмы TEAPO [3]. Отталкиваясь от максимально допустимой рабочей температуры 85 °С для алюминиевых конденсаторов с жидким электролитом и 105 °С для твердотельных полимерных, будем в расчетах понижать рабочую температуру ступенями по 10 °С, одновременно изменяя пульсации рабочего тока на уровне 25%, 50%, 75% и 100% от максимально допустимого значения. Результаты расчета представлены в таблице 2. Анализируя полученные данные, можно убедиться в несомненном преимуществе твердотельных полимерных конденсаторов, поскольку при любых условиях их долговечность оказывается в 3...6 раз выше по сравнению с конденсаторами на основе жидкого электролита. Да и сами исходные условия для полимерных конденсаторов несопоставимо тяжелее. Например, максимально жесткий режим у конденсаторов с жидким

Таблица 2. Зависимость долговечности конденсаторов от рабочей температуры и пульсаций тока

Условия нагрузки	Долговечность конденсаторов серии SK, час (лет)				Долговечность конденсаторов серии CG, час (лет)			
	0,1	0,2	0,3	0,4	1,25	2,5	3,75	5,0
$I_{\text{пульс}}, \text{A}$								
$t=T_{\text{max}}, \text{ }^\circ\text{C}$	1915(0,22)	1682(0,19)	1354(0,15)	1000(0,11)	13755(1,57)	10607(1,21)	6878(0,79)	3750(0,43)
$t=T_{\text{max}} -10, \text{ }^\circ\text{C}$	3830(0,44)	3364(0,38)	2709(0,31)	2000(0,23)	27510(3,14)	21213(2,42)	13755(1,57)	7500(0,86)
$t=T_{\text{max}} -20, \text{ }^\circ\text{C}$	7661(0,87)	6727(0,77)	5417(0,62)	4000(0,46)	55020(6,28)	42426(4,84)	27510(3,14)	15000(1,71)
$t=T_{\text{max}} -30, \text{ }^\circ\text{C}$	15322(1,75)	13454(1,54)	10834(1,24)	8000(0,91)	110040(12,56)	84853(9,69)	55020(6,28)	30000(3,42)

Таблица 3. Твердотельные полимерные конденсаторы фирмы TEAPO

Серия	Параметры серии	Максимально допустимая температура, $^\circ\text{C}$	Долговечность при макс. темп., ч	Емкость, мкФ	ЭПС, МОм	Максимально допустимое рабочее напряжение, В
CP	Ультранизкое ЭПС, низкопрофильные (высота до 8 мм)	105	3000	10...1200	6...25	2,5...25
CG	Ультранизкое ЭПС	105	2000	10...2200	7...80	2,5...25
CR	Ультранизкое ЭПС, высокие токи пульсации	105	2000	470...2700	6...8	2,5...6,3
CF	Супернизкое ЭПС, большая емкость	105	2000	22...1800	7...40	6,3...35
CY	Супернизкое ЭПС, большая емкость	105	2000	150...1800	10...30	6,3...16
CX	Ультранизкое ЭПС, высокие токи пульсации, алюминиевый корпус	105	2000	33...820	7...35	2,5...28
CZ	Ультранизкое ЭПС, компактные размеры	105	2000	10...2200	10...80	2,5...16
CH	Ультранизкое ЭПС, большая долговечность	105	5000	270...820	7...16	2,5...16
CT	Высокотемпературные	125	1000	10...1000	12...60	6,3...25
CS	Большая емкость, большая долговечность, высокое напряжение	105	5000	56...390	25...29	25...50
VP	Для поверхностного монтажа	105	2000	22...1500	10...50	2,5...25
VB	Для поверхностного монтажа, высокая емкость, супернизкое ЭПС	105	2000	68...1200	12...25	2,5...16
VS	Для поверхностного монтажа, большая долговечность, ультранизкое ЭПС	105	2000	39...330	20...30	4...16

электролитом соответствует температуре  $85^\circ\text{C}$  и пульсациям тока  $0,4 \text{ A}$ , а у полимерных –  $105^\circ\text{C}$  и  $5 \text{ A}$ . Аналогичный вывод можно получить при анализе диаграмм, размещенных на рис. 13 [2]. Здесь учитывают необратимое уменьшение емко-

сти конденсатора в процессе эксплуатации и считают, что конденсатор подлежит замене при снижении емкости более допустимых техническими условиями (ТУ) пределов – 10 или 20%.

Подводя итог проведенному сравнительному анализу параметров трех различающихся по технологии изготовления типов конденсаторов, можно сделать вывод о несомненном преимуществе параметров полимерного конденсатора серии CG. Компания TEAPO производит также множество других серий полимерных конденсаторов, но в рамках одной статьи подробно их осветить просто невозможно, поэтому ограничимся лишь общей характеристикой.

### Обзор полимерных конденсаторов фирмы TEAPO

Полную номенклатуру конденсаторов, производимых фирмой TEAPO, и подробную характеристику параметров можно почерпнуть из источника [4]. Вкратце познакомимся лишь с твердотельными полимерными, представленными в таблице 3.

Пользуясь приведенными в таблице данными, конструктор в соответствии с техническим заданием на прорабатываемый

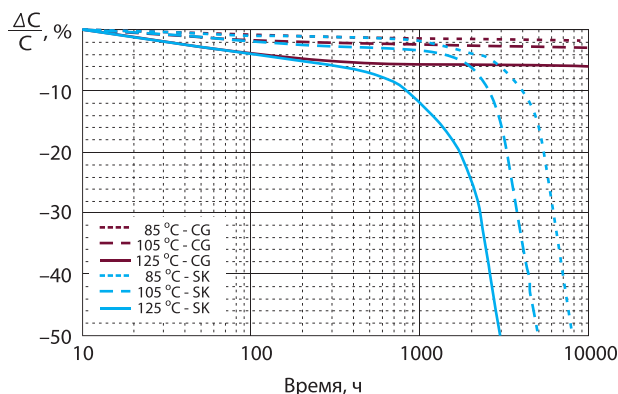


Рис. 13. Температурная зависимость долговечности танталового и полимерного конденсатора



проект сможет выбрать такой типонаминал твердотельного полимерного конденсатора, который позволит без труда достичь требуемых технических параметров устройства. Данные по ЭПС для конкретного конденсатора представляют собой некоторое значение в интервале, показанном в таблице, причем, как это пояснялось ранее, с уменьшением емкости выбранного конденсатора его ЭПС возрастает, и наоборот.

Габаритные размеры твердотельных полимерных конденсаторов также сильно разнятся в зависимости от серии, емкости и максимально допустимого рабочего напряжения. Приведем данные лишь для используемых нами в испытании конденсаторов серии CG (рис. 14). Здесь диаметр корпуса  $D$  может принимать значения от 4 до 10 мм, диаметр выводов  $d$  – 0,45...0,6 мм, высота корпуса  $H$  – 5,4...12,5 мм, межвыводное расстояние  $P$  – 1,5...5±0,5 мм. Для остальных типонаминалов требуемые характеристики без труда можно найти в [4].

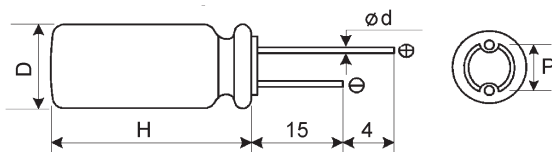


Рис. 14. Габаритные размеры полимерных конденсаторов серии CG



Рис. 15. Маркировка полимерных конденсаторов

Маркировка конденсаторов производится на торцевой стороне корпуса так, как это показано на рис. 15.

### Заключение

Стремительное развитие рынка электронной техники в настоящее время ускоряется благодаря зарождению и становлению все новых и новых прикладных цифровых и интернет-технологий. Производители в сегменте инновационных приборов и оборудования, стремясь обеспечить себе конкурентные преимущества на рынке за счет безупречной надежности своих продуктов, вынуждены применять комплекующие компоненты с высочайшими техническими па-

раметрами. Также одним из определяющих критериев выбора элементной базы служит репутация ее поставщика. Удачным примером производителя с мировым именем, который одновременно с постоянным высоконаучным обеспечением своего производства руководствуется грамотным менеджментом в области ценовой политики реализуемых на рынке пассивных элементов, заслуженно следует признать компанию Teapo Electronic Corporation.

Данная фирма осуществляет прямые поставки своей продукции более чем четырёмстам ведущим производителям компьютерной техники и телекоммуникационного оборудования, блоков питания и бытовой электронной техники, среди которых можно назвать всемирно известные компании LiteOn, Dell, Asus, Gigabyte, Elitegroup, Motorola, Hewlett Packard и многие другие.

Приведенная аргументация стратегии выбора элементной базы наряду с широкой технической поддержкой своей продукции, осуществляемой компанией Teapo Electronic Corporation, для любого конструктора, выбирающего в своей практической деятельности полимерные конденсаторы от данного производителя, служит убедительной гарантией того, что разработанный им прибор не ухудшит технические показатели в течение всего расчетного срока службы.

Дополнительную информацию о продукции Teapo Electronic Corporation можно получить у официального дистрибьютора в России и Украине – компании PT Electronics, [passive@ptelectronics.ru](mailto:passive@ptelectronics.ru).



### Литература

1. <http://www.teapo.com.tw>
2. [Phhttp://ptelectronics.ru/wp-content/uploads/Teapo\\_polymer\\_cap\\_2014.ppt](http://ptelectronics.ru/wp-content/uploads/Teapo_polymer_cap_2014.ppt)
3. Introduction of Life Calculation Formula - [http://ptelectronics.ru/wp-content/uploads/20140108\\_Alum\\_E-CAP\\_Life\\_Calculation\\_Formula\\_Intro.ppt](http://ptelectronics.ru/wp-content/uploads/20140108_Alum_E-CAP_Life_Calculation_Formula_Intro.ppt)
4. Full Page Catalog [www.teapo.com/WebSiteFile/Download/Catalog.pdf](http://www.teapo.com/WebSiteFile/Download/Catalog.pdf)