

Электролитические конденсаторы: особенности конструкции и проблемы выбора

Владимир ГУРЕВИЧ,
к. т. н.

В последние десятилетия, которые отличаются бурным развитием компьютерных технологий и расширяющимся применением импульсных источников питания, отказы алюминиевых электролитических конденсаторов приобрели столь широкие масштабы, что о них заговорили как о «конденсаторной чуме» (“capacitor plague”), нанесшей ущерб в сотни миллионов долларов.

По некоторым опубликованным данным, на долю электролитических конденсаторов приходится до 70% всех повреждений компьютеров и компьютеризированных систем. Попытки как-то объяснить эту ситуацию привели к появлению совершенно невероятной истории, кочующей из одного журнала в другой и с одного интернет-портала — на другой. Согласно этой байке, якобы в 1999 (по другой версии, в 2001-м) году некий китайский ученый, работавший на японскую компанию, занимающуюся производством электролитических конденсаторов, ухитрился выкрасть секретную формулу новейшего электролита. И все бы ничего, да только украденная у японцев формула оказалась неполной, и теперь миллионы электролитических конденсаторов с «неправильным» электролитом на водной основе распространились по всему миру. В течение нескольких дней или месяцев эти конденсаторы впитывают в себя водород из воздуха и взрываются, портя мате-

ринскую плату или любую схему, на которой они установлены.

Авторов этой байки не смущает, что речь идет о конденсаторах десятков различных компаний-производителей, в том числе, кстати, и японских, и что эта проблема остается актуальной уже в течение десятка лет. Не смущает их и то, что в патентных фондах многих стран мира, включая США и Россию, насчитываются сотни открытых патентов на электролит для конденсаторов, в которых подробно описаны химический состав и технология производства электролитов. Кроме того, для химических лабораторий, оснащенных современным аналитическим оборудованием, определить состав электролита, взятого из конденсатора, не представляет особого труда. Все это делает совершенно бессмысленной кражу «формулы электролита» и доказывает полную несостоятельность распространенной байки, выдуманной, по-видимому, не очень компетентным в этой области журналистом.

Но, тем не менее, проблема действительно существует. И не только в компьютерах. Автор этой статьи лично выявил сотни поврежденных электролитических конденсаторов в модулях источников питания десятков отказавших микропроцессорных устройств релейной защиты (МУРЗ) различных типов и разных производителей. С чем же связано резкое обострение этой проблемы в последнее десятилетие? Попробуем разобраться.

Для этого прежде всего познакомимся с тем, как устроен самый обычный алюминиевый электролитический конденсатор (рис. 1). Судя по представленному рисунку, конструкция электролитического конденсатора напоминает конструкцию старого бумажного конденсатора: те же два слоя фольги и слой бумаги между ними, свернутые в рулон, помещенный в защитный алюминиевый кожух (рис. 2).

Однако, несмотря на внешнюю схожесть, в действительности имеются принципиальные отличия в конструкции электролитического конденсатора. Основное из них заключается в том, что, в отличие от бумажного, в электролитическом конденсаторе бумажные ленты вовсе не являются изолирующим материалом между обкладками, поскольку они пропитаны электропроводным электро-

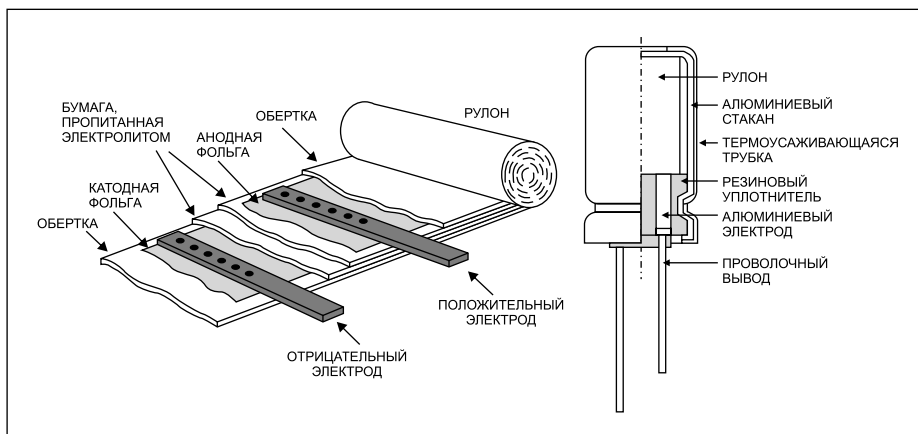


Рис. 1. Конструкция алюминиевого электролитического конденсатора

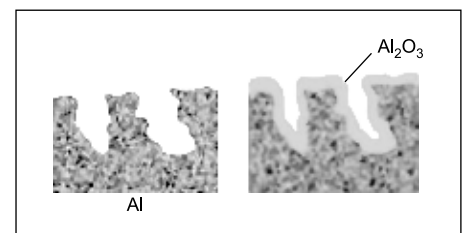


Рис. 2. Поверхность анодной фольги после электрохимического травления

литом, а играют роль сепараторов, удерживающих жидкий электролит в своих порах. Изолятором между обкладками служит очень тонкий (доли — единицы микрон) слой оксида алюминия (Al_2O_3), образованный на поверхности анодной фольги. Именно благодаря малой толщине диэлектрика (недостижимой для конденсаторной бумаги) и удается получить очень большую (по сравнению с бумажными конденсаторами) емкость, которая, как известно, обратно пропорциональна расстоянию между обкладками.

Дополнительное увеличение емкости достигается увеличением площади обкладок, а точнее — площади их поверхности. В электролитических конденсаторах площадь поверхности анодной фольги увеличивают путем ее электрохимического травления (перед образованием оксидного слоя), после которого поверхность становится как бы шероховатой (рис. 2). Чем больше эта «шероховатость» поверхности, тем больше ее площадь. Этим приемом удается повысить емкость конденсаторов в 20–100 раз. Электролит, фактически выполняющий роль катода, свободно проникает в неровности поверхности фольги. Катодная фольга в таком конденсаторе выполняет вспомогательную роль электрода, соединяющего электролит с внешним минусовым выводом. Иногда и ее поверхность подвергают травлению, чтобы улучшить контакт с электролитом и уменьшить переходное сопротивление.

Оксид алюминия существует в нескольких кристаллических формах, наиболее распространенная из которых $\alpha-Al_2O_3$ — корунд, известный в ювелирном деле как рубин (содержащий примеси, окрашивающие его в красный цвет) и сапфир (с примесями, придающими оттенки синего цвета). Этот кристалл практически не растворим в воде и в кислотах, является полупроводником *n*-типа, образующим эквивалент диода при физическом контакте с металлами (вольтамперная характеристика такого контактного соединения представляет собой типичную характеристику диода). Именно этим свойством оксида алюминия объясняется наличие диода *D* в схеме замещения электролитического конденсатора (рис. 3). Этот диод включен в обратном направлении, и его пробивным напряжением ограничивается рабочее напряжение конденсатора. Наличие этого же диода обуславливает и необходимость соблюдения полярности обычных электролитических конденсаторов.

Индуктивность алюминиевых электролитических конденсаторов (примерно от 20 до 200 нГн) в первую очередь определяется индуктивностью намотки фольги и при расчетах полного сопротивления (импеданса) конденсатора обычно не принимается во внимание, так как преобладающее влияние на полное сопротивление конденсатора оказывает его эквивалентное последовательное сопротивление — ЭПС (Equivalent Series Resistance, ESR), которое зависит от сопротивления электролита и выводов анода и катода, включая внутренние переходные контактные сопротивления. Но это справедливо лишь для относительно низких частот (менее 100–1000 кГц). На высоких частотах индуктивность начинает сильно влиять на импеданс конденсатора, поэтому учитывается такой показатель, как эквивалентная последовательная индуктивность — ЭПИ (Equivalent Series Inductance, ESL). Фактически ЭПИ ограничивает частоту, выше которой конденсатор работать не может. Чем больше ЭПИ, тем ниже предельная частота, на которой конденсатор еще представляет собой емкость. Однако поскольку электролитические конденсаторы не предназначены для работы на высоких частотах, производители таких конденсаторов практически никогда не приводят значение этой величины в справочных материалах.

Оксид алюминия — очень твердый и хрупкий материал, он может трескаться в процессе намотки рулона или во время эксплуатации конденсатора. При этом образуются микротрещины и микропоры, через которые может проникать электропроводный электролит, что приводит к увеличению тока утечки. Кроме того, и коэффициент линейного расширения у алюминия в несколько раз больше, чем у оксидной пленки, поэтому при изменении температуры на границе их раздела возникают дополнительные внутренние напряжения, что также может привести к возникновению дефектов (трещин). Чем

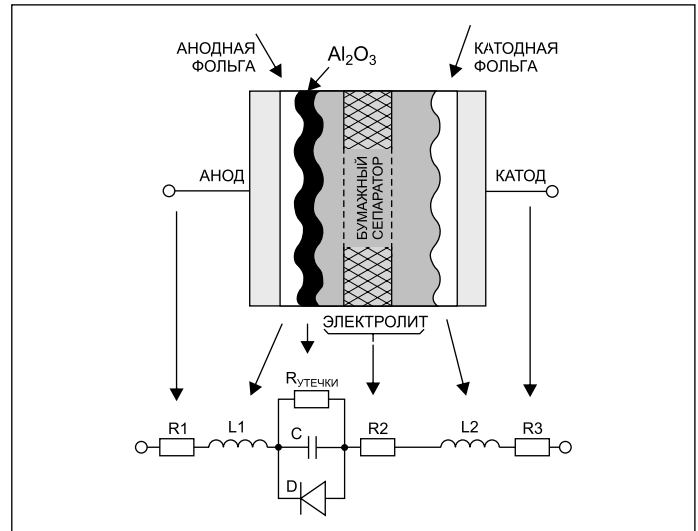


Рис. 3. Схема замещения электролитического конденсатора: R1, R3 — сопротивления выводов анода и катода, включая внутренние переходные контактные сопротивления; R2 — сопротивление электролита; L1, L2 — индуктивность намотки анодной и катодной фольги; Rутечки — сопротивление утечки через дефекты слоя оксида алюминия; C — емкость слоя оксида алюминия (емкость конденсатора); D — эквивалентный диод, образованный слоем оксида алюминия, нанесенного на алюминиевую фольгу

меньше ток утечки, тем качественнее конденсатор. У хороших электролитических конденсаторов этот ток не превышает десятков — сотен микроампер (в зависимости от емкости, температуры и приложенного напряжения). Электролит должен иметь такой химический состав, который обеспечивал бы восстановление микрповреждений слоя оксида алюминия. И это далеко не единственное требование к электролиту.

Современные электролиты для конденсаторов представляют собой сложные многокомпонентные смеси кислот и солей, в которых прохождение электрического тока осуществляется за счет движения ионов и сопровождается электролизом. От электролита зависит работоспособность конденсатора при определенных номинальных напряжениях в определенном интервале рабочих температур, а также номинальный ток пульсации и срок службы конденсатора. К рабочему электролиту предъявляются различные, зачастую противоречащие друг другу требования [1]:

- высокая собственная проводимость;
- малые изменения проводимости во всем интервале рабочих температур;
- хорошая формующая способность — для подформовки анода, то есть быстрого восстановления на алюминиевом фольговом аноде диэлектрической пленки оксида алюминия по кромкам и микротрещинам, образовавшимся при резке фольги и намотке конденсаторного элемента;
- стабильные характеристики при максимальной рабочей температуре;
- отсутствие коррозии и химическая совместимость с алюминием, оксидом алюминия, конденсаторной бумагой сепаратора;
- хорошая впитываемость прокладочной конденсаторной бумаги;
- стабильность параметров при хранении в нормальных условиях;
- низкие уровни токсичности и воспламеняемости.

Основными компонентами электролита являются ионообразующие вещества (ионогены), органические и неорганические кислоты и их соли, но они редко применяются в натуральном виде. Как правило, их следует растворять в подходящем составе, чтобы произошла электролитическая диссоциация с образованием ионов и получился электролит с нужной величиной вязкости. Из кислот можно исполь-

зовать монокарбоновые (нонановая, олеиновая, стеариновая) и дикарбоновые кислоты (янтарная, адипиновая, азелаиновая, себациновая, додекандикарбоновая, тридекандикарбоновая), а также ортофосфорная, борная кислоты, бензойная кислота (или бензоат аммония). Борная кислота улучшает формующую способность электролита.

Для средне- и высоковольтных конденсаторов в качестве растворителей можно использовать лактоновые и амидные растворители. Электролиты на основе лактоновых растворителей позволяют средне- и высоковольтным конденсаторам достигать высокой надежности и большого срока эксплуатации, однако нижняя граница рабочей температуры конденсаторов с такими электролитами ограничена, как правило, значением $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Электролиты на основе амидных растворителей позволяют достичь конденсатору нижней границы рабочей температуры $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и даже менее. Однако эти электролиты не способны обеспечить большой срок эксплуатации конденсатора, так как они очень летучи, а также вступают в реакцию с оксидом алюминия на аноде и разрушают его, что приводит к росту тока утечки в конденсаторе и сокращению срока его службы. С другой стороны, при снижении содержания амидных растворителей и замене их на другие составы, менее летучие и менее агрессивные по отношению к оксиду алюминия, низкотемпературные характеристики электролита, а следовательно, и конденсатора ухудшаются и уменьшается проводимость электролита.

Электролит не должен проявлять повышенное газообразование (при работе электролитического конденсатора идет процесс электролиза, сопровождающийся образованием водорода на катоде конденсатора) при повышенной температуре, в том числе на верхней границе интервала рабочих температур. Понизить газообразование можно с помощью введения в электролит в качестве добавок катодных деполаризаторов, например ароматического нитросоединения. Удельная проводимость зависит от остаточного содержания воды в приготовленном электролите, в том числе образованной в процессе химического взаимодействия его компонентов. Для увеличения электропроводности электролита также можно добавлять к электролиту деионизованную воду. В результате, при попытке удовлетворения всех этих требований электролит становится сложным химическим соединением, включающим множество компонентов, например таких [2]:

- этиленгликоль;
- алканол;
- ацетонитрил;
- себациновая кислота;
- додекановая кислота;
- этилдиизопропиламин;
- борная кислота;
- гипофосфористая кислота;

- гидроксид аммония;
- деионизованная вода.

Итак, на параметры электролита влияют как его состав, так и технология его приготовления, а электрические характеристики конденсатора и срок его службы в значительной степени зависят от параметров использованного в нем электролита.

В процессе длительной эксплуатации конденсатора в нем происходит множество сложных электрохимических реакций, связанных не только с восстановлением оксидного слоя, но и с коррозионным разрушением некоторых внутренних элементов, например мест соединения фольги с электродами. В результате неизбежных коррозионных процессов увеличивается эквивалентное последовательное сопротивление (ЭПС) конденсатора, что приводит к дополнительному повышению температуры и к еще большей интенсификации негативных химических и физических процессов внутри конденсатора, то есть к ускоренному ухудшению его параметров.

Процесс естественного увеличения ЭПС (то есть естественного старения конденсатора) протекает медленно (10–20 лет и более). Кроме естественного старения, в ряде случаев имеет место и преждевременный выход из строя конденсаторов. Главная причина этого — его перегрев. Когда температура конденсатора достигает точки кипения электролита, внутреннее давление возрастает и некоторое количество электролита уходит наружу через дренаж, то есть через нижнюю пробку, или через специальный клапан (в конденсаторах большой емкости), или через разрыв специально прослабленного насечкой места в верхней части алюминиевого стакана (рис. 4).



Рис. 4. Пути дренажа электролита в алюминиевых конденсаторах:
1 — специальная насечка, ослабляющая дно алюминиевого стакана;
2 — пластмассовая или резиновая пробка, закрывающая стакан и фиксирующая выводы;
3 — клапан в конденсаторах большой емкости

После потери части электролита увеличивается ЭПС, что становится причиной еще большего разогрева. Эта положительная обратная связь приводит к быстрому выходу конденсатора из строя. Вследствие потери электролита в электролитических конденсаторах происходит резкое снижение емкости

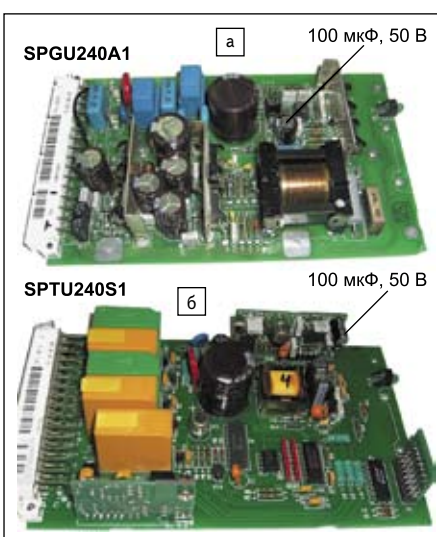


Рис. 5. Источники питания микропроцессорных реле защиты типов SPAC, SPAU, SPAJ (ABB):
а) SPGU240A1; б) SPTU240S1

конденсатора и даже полный обрыв внутренней цепи.

Что происходит в электронной аппаратуре при дренаже электролита? Во-первых, при существенном снижении емкости конденсатора нарушается нормальная работа многих схем: ухудшается фильтрация переменной составляющей, снижается напряжение на чувствительных элементах схемы и т. д. Из практики эксплуатации МУРЗ известны случаи массовых отказов реле типов SPAC, SPAU, SPAJ (производства ABB) по причине значительного снижения емкости лишь одного конденсатора емкостью 100 мкФ в источниках питания (рис. 5).

Во-вторых, происходит короткое замыкание выводов микроэлектронных компонентов при попадании на них электропроводного электролита и их отказ в работе. При попадании электролита на силовые элементы источника питания, находящиеся под сетевым напряжением, происходит короткое замыкание силовой цепи, что сопровождается интенсивной дугой и взрывоподобным физическим разрушением этих элементов, а также выбросом на соседние элементы большого количества электропроводной сажи (рис. 6). Кроме того, кислоты, содержащиеся в электролите, быстро разрушают лаковое покрытие печатной платы (маску) и растворяют медные дорожки печатной платы (рис. 6).

Иногда, при определенном составе электролита, с повышением температуры и давления происходит ускоренное испарение его летучих фракций через пробку, а не вытекание электролита. При некачественном электролите в процессе внутренних химических реакций в конденсаторе образуется большое количество водорода, который выходит через уплотнение пробки. В этих случаях количество электролита в конденсаторе также

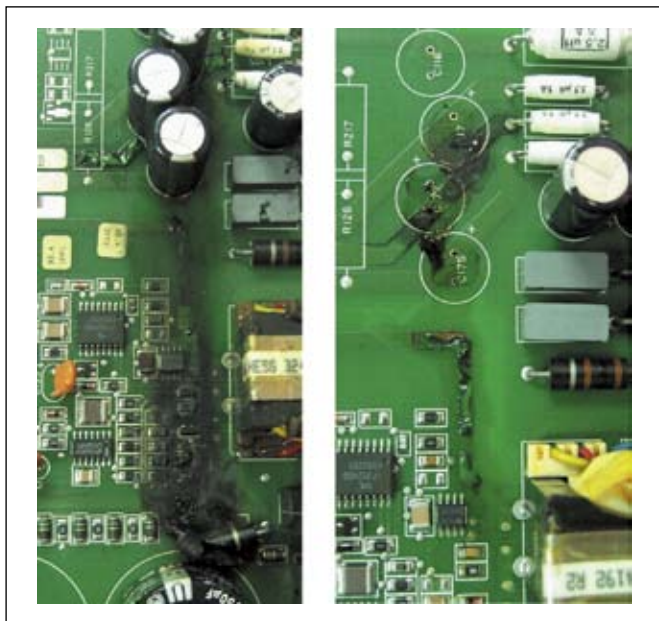


Рис. 6. Разрушение печатных плат и элементов вытекшим из конденсаторов электролитом



Рис. 7. Источник питания типа 316NN63 микропроцессорных реле серии RE*_316 (ABB) (выделена группа конденсаторов, дренаж электролита из которых приводит к массовым отказам источников питания)

уменьшается (часть его переходит в газообразную фракцию), а вместе с ним и емкость конденсатора, причем в десятки раз за период в 5–10 лет.

Каковы же причины преждевременного отказа алюминиевых конденсаторов? Несомненно, конденсаторы плохого качества, произведенные с нарушением технологических процессов и из некачественных материалов, не будут долго служить в аппаратуре. Однако теорию «плохо украденного» рецепта электролита все же отбросим сразу. О ее несостоятельности уже говорилось выше.

К вышесказанному можно добавить, что в источниках питания содержится много однотипных конденсаторов, включенных в различные цепи, но из строя выходит только один из них (рис. 5) или группа, включенная в определенную цепь (рис. 7), что однозначно указывает на иную «теорию» и другое объяснение причин массовых отказов конденсаторов.

Анализ цепей, в которые включены часто повреждающиеся электролитические конденсаторы, показывает, что речь идет о цепях с напряжением высокой частоты (на которой работает данный импульсный источник питания). Современные мощные импульсные источники питания работают на частотах в десятки килогерц, а маломощные — в диапазоне сотен килогерц [3]. Поскольку тангенс угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta = 2\pi fCR$, где $R \approx \text{ЭПС}$) прямо пропорционален частоте f , то становится понятным, что при работе на таких частотах из-за возникающих дополнительных потерь происходит дополнительный нагрев электролита и повышение давления в конденсаторе со всеми вытекающими отсюда (в прямом и переносном смысле) последствиями.

Однако, судя по приведенной выше формуле, потери в конденсаторе, вызывающие его дополнительный нагрев, зависят прямо пропорционально не только от частоты, но и от ЭПС. А это значит, что при выборе для работы в импульсных источниках питания конденсаторов с особо низким значением ЭПС можно будет добиться существенного снижения нагрева электролита и увеличения срока службы конденсаторов, который нормируется в технической документации производителей для условий работы при максимальной допустимой температуре. Например, для конденсаторов типа K50-75 минимальная наработка при температуре +85 °C составляет всего 1000 ч, тогда как при снижении температуры до +55 °C она увеличивается до 10000 ч [4].

Здесь следует отметить, что предлагаемый иногда такой метод защиты электролитических конденсаторов от повреждения, как шунтирование керамическими конденсаторами небольшой емкости, является распространённым заблуждением. На частотах в десятки-сотни килогерц сопротивление керамического конденсатора малой емкости намного превышает ЭПС даже самого плохого электролитического конденсатора, а для того чтобы эффективно защитить электролитический конденсатор от воздействия таких частот, ЭПС защитного конденсатора должно быть хотя бы соизмеримо с ЭПС защищаемого конденсатора. Простейший расчет показывает, что для удовлетворения этого условия емкость защитного конденсатора на частоте 100 кГц должна составлять около 5 мкФ. А это уже крупные пленочные конденсаторы, для которых нужно слишком много места на печатной плате, что делает такое решение неприемлемым.

В соответствии с требованиями стандарта [5] в технической документации на оксидные электролитические конденсаторы надлежит указывать их импеданс на определенной частоте. В международной практике принято указывать импеданс (полное сопротивление) на типичной для импульсных источников питания частоте 100 кГц. На этой частоте импеданс и ЭПС отличаются незначительно. В технической документации западных производителей электролитических оксидных конденсаторов с пониженным значением ЭПС можно встретить такие названия для серий конденсаторов:

- Low Impedance;
- Very Low Impedance;
- Ultra Low Impedance;
- Extremely Low Impedance.

Анализ значений импеданса конденсаторов этих серий показывает, что далеко не всегда реальные значения соответствуют превосходным степеням в названиях серий. Поэтому такие названия нужно воспринимать всего лишь как рекламный трюк, и ориентироваться на них не следует. В каждом конкретном случае выбора электролитических конденсаторов для работы в импульсных источниках питания необходимо проверять значение импеданса конденсатора на частоте 100 кГц по технической документации производителя.

К сожалению, в технической документации российских производителей на обычные конденсаторы общего применения значение импеданса часто вообще не указывается. Для некоторых типов конденсаторов (например, K50-75, АДПК.673541.011) из 33 типовых значений импеданса приведено лишь для четырех. И даже в документации на конденсаторы военного применения

Таблица 1. Импеданс оксидных электролитических конденсаторов ведущих мировых производителей для частоты 100 кГц и температуры 20 °С

Импеданс на частоте 100 кГц при температуре 20 °С	K50-53	K50-38	KZE	HD	ZL	FM
	Воронежский конденсаторный завод		Nippon Chemicon	Nichicon	Rubicon	Panasonic
6,3 В, 1000 мкФ	0,4	0,3	0,053		0,053	0,038
25 В, 470 мкФ	0,3	0,35	0,038		0,041	0,026
50 В, 100 мкФ	1	0,6	0,074		0,12	0,061

(приемка «5»), классифицируемые как «низкоимпедансные» (например, типа K50-83, АЖЯР.673541.012 ТУ), хоть и приведено значение ЭПС и импеданса, но не указано, для какой частоты и для какой температуры, что не позволяет корректно оценить эти параметры. В документации лишь очень небольшого количества типов конденсаторов российского производства четко и корректно отражено значение импеданса, что позволяет сравнить их с лучшими образцами конденсаторов мировых производителей (табл. 1).

Приведенные данные позволяют сделать вывод, что российские производители имеют еще много возможностей для улучшения параметров выпускаемых ими конденсаторов.

ЭПС конденсаторов можно оценивать не только по технической документации производителей, но и непосредственно измерять с помощью простых приборов, работающих на стандартной частоте 100 кГц. На рынке представлено несколько моделей таких простых и относительно дешевых (\$150–200) приборов, например ESR60 компании Peak Electronic Design (рис. 8), который можно приобрести через международные компании-поставщики электронных компонентов, такие как RS, Farnell и др. Большинство имеющихся на рынке приборов такого типа позволяют оценить исправность конденсаторов, при этом конденсаторы не нужно выпаивать из схемы.

Необходимо отметить, что надежность импульсных и входных сетевых фильтрующих конденсаторов зависит также от предельно допустимого тока пульсаций. Ток пульсаций, протекающий через электролит, дополнительно разогревает его, а конденса-



Рис. 8. Популярный прибор типа ESR60 для измерения емкости и эквивалентного последовательного сопротивления (ЭПС)

тор, работающий на верхнем пределе допустимого температурного диапазона, имеет очень небольшую наработку, обычно не более 1000–2000 ч. Поэтому важно при выборе электролитического конденсатора учитывать и этот параметр: производитель, как правило, приводит его в своей документации.

В процессе развития и расширения сферы применения микропроцессорной техники обнаружилась еще одна проблема с электролитическими конденсаторами. Современные мощные процессоры представляют собой так называемую динамическую нагрузку и работают в режиме высокочастотного импульсного потребления значительных токов по цепям питания. Обычные компьютерные процессоры потребляют ток 5–10 А. У современных мощных процессоров с их миллиардами транзисторов (4-ядерный процессор Intel, известный под названием Tukwila, содержит свыше двух миллиардов транзисторов, а в новом графическом процессоре NVIDIA Fermi их уже более трех миллиардов) потребляемый ток доходит до нескольких десятков ампер. А это означает, что через конденсаторы в цепях питания процессоров будут протекать значительные высокочастотные токи заряда и разряда, что ничуть не лучше, чем условия их работы в импульсных источниках питания. Поэтому случаи массовых отказов электролитических конденсаторов наблюдаются не только в источниках питания, но и на материнских платах, в цепях питания процессоров.

Несколько облегчает ситуацию то, что современные высокопроизводительные микропроцессоры, в отличие от первичных источников питания, работают при очень низких напряжениях. Так, если самые первые микропроцессоры имели питающее напряжение 5 В, то микропроцессоры последних поколений уже могут работать при значительно более низких напряжениях. Например, процессор Intel Xeon может работать при напряжении 1,5–1,33 В, потребляя при этом ток до 65 А, что дает возможность использовать на материнских платах низковольтные конденсаторы поверхностного монтажа других типов (а не оксидные алюминиевые с напряжением до 600 В).

Наибольшее распространение в качестве альтернативы оксидным алюминиевым получили танталовые конденсаторы. Считается, что танталовые конденсаторы намного лучше алюминиевых, потому что именно они применяются в специальной военной

и аэрокосмической аппаратуре. Но так ли это в действительности и что представляют собой танталовые конденсаторы?

Существуют по меньшей мере два больших класса танталовых конденсаторов: с жидким и твердым электролитом. Основное конструктивное отличие танталовых конденсаторов от алюминиевых заключается в устройстве их анода и катода. В танталовых конденсаторах обоих классов анод выполнен не в виде ленты, смотанной в рулон, как у оксидных алюминиевых, а в виде объемной высокопористой таблетки цилиндрической формы из спеченных в вакууме при температуре 1300...2000 °С гранул танталового порошка с запрессованным внутри проволочным выводом (рис. 9).

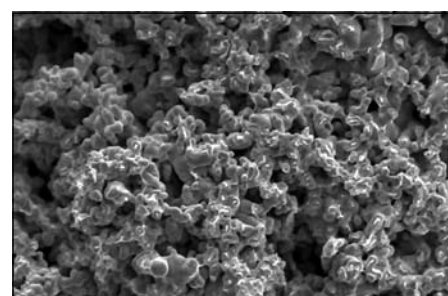


Рис. 9. Структура спеченных гранул тантала

Такая конструкция анода обусловила название первых в СССР серий танталовых конденсаторов: ЭТО-1 и ЭТО-2 (электролитические танталовые объемно-пористые), производство которых было освоено в конце 1950-х — начале 1960-х годов (рис. 10). В этих конденсаторах использована способность тантала к образованию (методом электрохимического окисления) на его поверхности окисной пленки — пентоксида тантала (пентоксида тантала) Ta₂O₅. Это очень стабильное высокотемпературное соединение, устойчивое в кислых электролитах и пропускающее ток только в направлении от электролита к металлу. Удельное электросопротивление пленки пентоксида тантала в направлении, не проводящем ток, очень высоко (7,5×10¹² Ом·см).

Эти конденсаторы оказались столь хороши, что, несмотря на свой полувековой возраст, до сих пор выпускаются новосибирским заводом «Оксид» под маркой K52-2 (ОЖО.464.049 ТУ), причем с приемкой «5» и «9» (то есть предназначены для использования в военной и аэрокосмической аппаратуре).

В качестве рабочего электролита в таких конденсаторах обычно применяют водный 35–38%-ный раствор серной кислоты (H₂SO₄). Именно такая концентрация серной кислоты обеспечивает ее максимальную электропроводность и максимально низкую температуру замерзания (около –60 °С). Электролит на основе серной кислоты, применяющийся в конденсаторах, обеспечивает

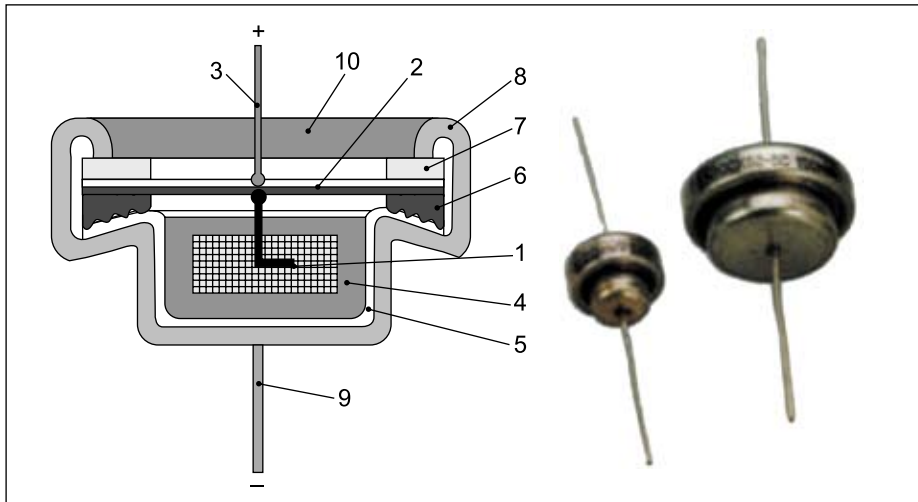


Рис. 10. Устройство танталового объемно-пористого конденсатора серии ЭТО и его современного аналога из серии К52-2: 1 — анод; 2 — танталовая крышка; 3 — анодный вывод; 4 — электролит; 5 — внутренний серебряный корпус; 6 — упругая прокладка; 7 — изоляционная прокладка; 8 — внешний стальной корпус; 9 — катодный вывод; 10 — заливка эпоксидной смолой

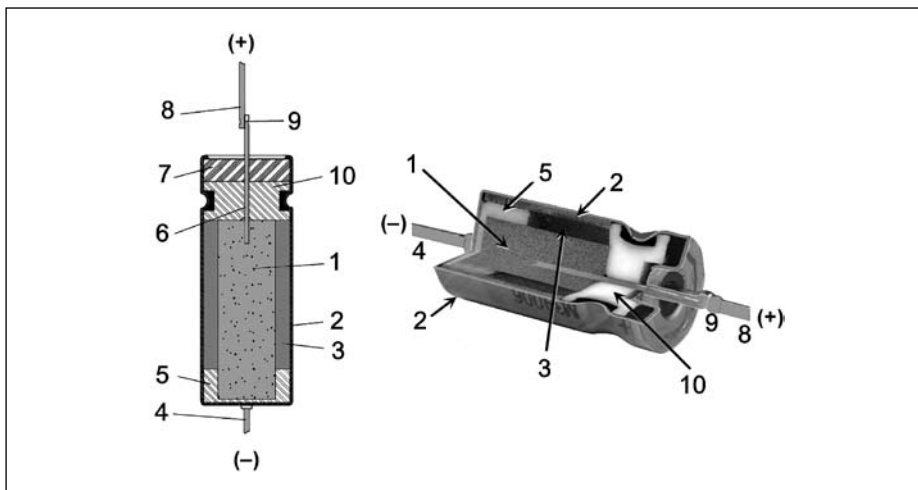


Рис. 11. Устройство современного объемно-пористого танталового конденсатора с жидким электролитом: 1 — таблетка из спеченных гранул тантала, 2 — серебряный (посеребренный) корпус (катод), 3 — электролит (кислота), 4 — вывод катода, 5 — внутренний фторопластовый изолятор, 6 — вывод анода из танталовой проволоки, 7 — изоляционная пробка (иногда — стеклянный изолятор), 8 — вывод анода (луженый никель), 9 — точка сварки анодных выводов, 10 — проходной фторопластовый изолятор

при температуре примерно 250 °С. При этом появляется слой диоксида марганца, который используется в качестве катода конденсатора. Механический и электрический контакт внешнего вывода со слоем диоксида марганца создается следующим образом: слой диоксида марганца покрывается графитом, графит в свою очередь покрывается слоем серебра, к которому уже припаяется проволочный катодный вывод. Катодный вывод корпуса, предназначенного для поверхностного монтажа, выполняется из электропроводного эпоксидного компаунда (с наполнителем из порошкообразного серебра).

В последние годы появилось множество разновидностей танталовых конденсаторов с твердым электролитом, отличающихся друг от друга составом и технологией нанесения электропроводного слоя на таблетку из спрессованных гранул тантала. В частности, получили распространение твердые электролиты из электропроводного полимера (рис. 12).

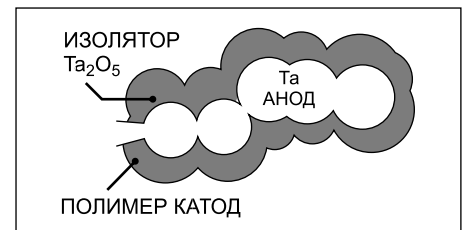


Рис. 12. Структура твердотельного танталового конденсатора с полимерным электролитом

Существует несколько типов электропроводных полимеров, нашедших применение в танталовых конденсаторах:

- тетрацианхинодиметан (tetracyano-quinodimethane, TCNQ);
- полианилин (polyaniline, PANI);
- полипирролл (polypyrrole, PPy);
- полиэтилендиокситиофен (polyethylenedioxythiophene, PEDOT).

Наибольшее практическое применение для изготовления конденсаторов (и не только) получил полимер последнего типа.

Танталовые конденсаторы с твердым электролитом свободны от такого серьезного недостатка оксидных алюминиевых, как высыхание и вытекание электролита.

А теперь несколько слов об особенностях танталовых электролитических конденсаторов. После упоминания о том, что танталовые конденсаторы, безусловно, лучше оксидных алюминиевых, некоторым сюрпризом оказывается тот факт, что такой важнейший параметр, как ЭПС, у танталовых конденсаторов с жидким электролитом намного хуже, чем у обычных алюминиевых (табл. 2). Следует сказать и о том, что в отличие от алюминиевых конденсаторов с их максимальным рабочим напряжением до 600 В максимальное напряжение танталовых конденсаторов ограничено на уровне 125 В (для большин-

удельное сопротивление около 1 Ом·см при 20 °С. В свое время были предложены и менее агрессивные электролиты, но они имеют большее удельное сопротивление (то есть ЭПС): раствор H_3PO_4 — 4,8 Ом·см, раствор $LiCl$ — 12 Ом·см и др., поэтому они не нашли широкого применения.

Использование такого агрессивного электролита, как серная кислота, заставляет применять двойной корпус: внутренний тонкостенный серебряный (нейтральный к кислоте) и наружный стальной — для обеспечения достаточной механической прочности. Большое внимание приходится уделять также уплотнению конструкции для предупреждения возможности утечки электролита.

Современные танталовые конденсаторы с жидким электролитом мало чем отлича-

ются от образцов, выпущенных 50 лет тому назад, но имеют более привычную для современных конденсаторов цилиндрическую форму (рис. 11).

Второй класс танталовых конденсаторов — с твердым электролитом. Как следует уже из самого названия этого класса, их главное отличие от описанных выше заключается в отсутствии жидкого электролита. Такие конденсаторы называют еще оксидно-полупроводниковыми, потому что в качестве твердого электролита в них используется диоксид марганца (MnO_2), обладающий полупроводниковыми свойствами. Слой диоксида марганца на таблетке из спрессованных гранул тантала с уже готовым слоем пентоксида тантала образуется выдержкой таблетки в растворе нитрата марганца с последующей сушкой

Таблица 2. Типичные значения ЭПС для частоты 100 кГц для танталовых конденсаторов при температуре 20 °С

Тип/производитель	Номинальное напряжение, В	Емкость, мкФ	ЭПС на частоте 100 кГц, Ом
Solid Tantalum 293D series / Vishay Intertechnology Inc.	6,3	1000	0,4
	20	100	0,5
	50	15	0,8
M3900622H0190 / Cornell Dubilier	100	22	0,4

ства типов даже 50 В), а также что танталовые конденсаторы не выдерживают малейших перенапряжений и даже быстрых выбросов напряжения, не превышающих их максимально допустимого значения, и пробиваются с закорачиванием цепи, в которую они включены. При пробое и протекании тока происходит сильное разогревание конденсатора и высвобождение кислорода из диоксида марганца, что в совокупности вызывает бурную окислительную реакцию и воспламенение конденсатора, что может привести к возгоранию аппаратуры. Для предотвращения пробоя танталовых конденсаторов, а также для увеличения наработки их приходится использовать при значениях напряжения, которые в 2–4 раза меньше максимально допустимых. С учетом того, что танталовые конденсаторы вообще не выпускаются на напряжения свыше 125 В (основная масса — на напряжение не более 50 В), это говорит о серьезном ограничении области применения таких конденсаторов.

Сравнение значений ЭПС (импеданса), приведенных в таблицах 1 и 2 для оксидных алюминиевых и танталовых электролитических конденсаторов, говорит не в пользу последних. К тому же танталовые конденсаторы заметно дороже алюминиевые. И даже специальные типы танталовых конденсаторов, заявленных как Low ESR, все-таки существенно уступают лучшим типам оксидных алюминиевых (табл. 3).

Некоторый позитив в эту мрачную картину вносит тот факт, что танталовые конденсаторы с полимерным катодом не имеют такой воспламеняемости, как конденсаторы, содержащие диоксид марганца, и имеют более низкое значение ЭПС (рис. 13).

Таблица 3. Типичные значения ЭПС для частоты 100 кГц и температуры 20 °С для низкоимпедансных танталовых конденсаторов

Тип/производитель	Номинальное напряжение, В	Емкость, мкФ	ЭПС на частоте 100 кГц, Ом
Solid Tantalum 293D series / Vishay Intertechnology Inc.	6,3	1000	0,1
	20	150	0,1
	50	15	0,3
CWR29 / AVX	6	330	0,18
	20	47	0,11
	50	4,7	0,5

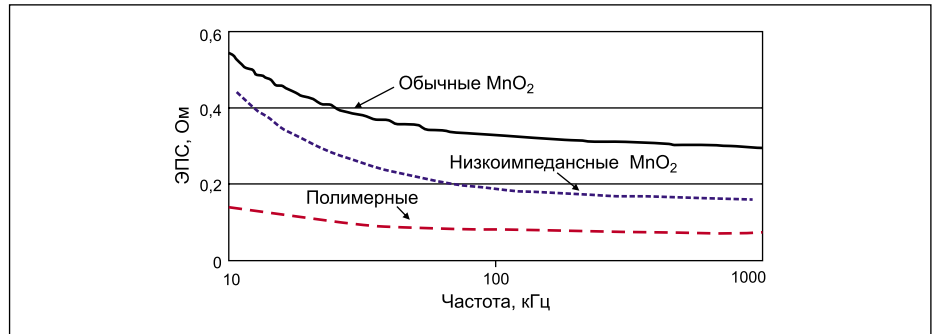


Рис. 13. Зависимость эквивалентного последовательного сопротивления (ЭПС) от частоты для конденсаторов с твердым электролитом различных типов

Но чем же все-таки так хороши танталовые конденсаторы и почему именно они применяются в военной аппаратуре?

Все виды танталовых конденсаторов имеют пониженные токи утечки, большую наработку и, главное, значительно более широкий диапазон рабочих температур, чем оксидные алюминиевые. Так, например, танталовые конденсаторы типа K52-18 при напряжении 0,6 В номинального значения и температуре +55 °С имеют минимальную наработку 150000 ч. А их диапазон рабочих температур простирается от –60 до +125 °С и выше (например, +155 °С для серии K52), что полностью соответствует требованиям стандарта ГОСТ РВ 20.39.304-98 по климатическим условиям для военной аппаратуры. Но это не имеет особого значения при использовании конденсаторов в промышленной аппаратуре, типа микропроцессорных устройств релейной защиты, имеющих значительно более узкий диапазон рабочих температур.

В последнее время были разработаны многослойные керамические конденсаторы большой емкости (100 мкФ и более), свободные от многих недостатков электролитических конденсаторов, но емкость этих конденсаторов сильно зависит от температуры, они пока существенно дороже электролитических и еще не получили широкого распространения.

Выводы и рекомендации

Важнейшим параметром электролитических конденсаторов, на который нужно обязательно обращать внимание при разработке новых импульсных источников питания или ремонте вышедших из строя, является последовательное эквивалентное сопротивление (ЭПС) или импеданс на частоте 100 кГц, которые должны быть минимальны.

Защита электролитических конденсаторов от воздействия высокочастотной составляющей путем шунтирования керамическими конденсаторами малой емкости не эффективна на частотах, используемых в импульсных источниках питания.

Работа современных микропроцессоров сопровождается потреблением значительных

по величине токов в режиме высокочастотных импульсов, поэтому конденсаторы, установленные в цепях питания микропроцессоров, подвергаются воздействию токов заряда и разряда с высокой частотой. Для такого режима работы необходимо также выбирать конденсаторы с минимальным значением ЭПС.

Основными видами повреждений оксидных алюминиевых электролитических конденсаторов в импульсных источниках питания являются высыхание или утечка электролита, что сопровождается резким уменьшением емкости конденсатора, прекращением функционирования источника и повреждением элементов печатной платы выткшим электролитом.

Основным видом повреждения танталовых конденсаторов в модулях центрального процессора являются их пробой, которые приводят к закорачиванию цепи, в которую они включены.

Сравнительный анализ параметров оксидных алюминиевых и танталовых конденсаторов показал, что, вопреки широко распространенному заблуждению об абсолютном качественном превосходстве танталовых конденсаторов, они существенно уступают алюминиевым по такому важнейшему показателю, как ЭПС. Кроме того, танталовые конденсаторы имеют значительно более узкий диапазон рабочих напряжений, явно недостаточный для работы в импульсных источниках питания, и не выдерживают даже минимальных перенапряжений.

Для импульсных источников питания невоенного назначения больше подходят оксидные алюминиевые электролитические конденсаторы. В цепях, в которых конденсаторы могут подвергаться воздействию высокой частоты, должны использоваться специальные конденсаторы с пониженным значением ЭПС. При этом ориентироваться нужно не на рекламные названия таких конденсаторов, а на данные, приведенные в технической документации или измеренные с помощью специальных приборов. Наиболее подходящими для такого применения являются конденсаторы серий FM, KZE, HD, ZL.

Танталовые конденсаторы с твердым электролитом в исполнении для поверхностного

монтажа имеют меньшие габариты, чем алюминиевые, более распространены и удобны для использования в модулях центрального процессора, однако и их нужно выбирать с учетом минимального значения ЭПС, если они используются в цепях питания микропроцессоров, причем с двух-трехкратным запасом по напряжению.

Для предотвращения внезапных и необратимых повреждений модулей импульсных источников питания ответственной электронной аппаратуры, в частности, микропроцессорных устройств релейной защиты, выпущенных 7–10 лет тому назад, рекомендуется произвести их осмотр, выявить номера поврежденных конденсаторов и осуществить

превентивную замену конденсаторов с этими номерами во всех источниках питания, не дожидаясь их выхода из строя, с учетом рекомендаций, приведенных в этой статье. При этом после выпаивания старых конденсаторов места их установки на печатной плате и места со следами вытекшего электролита должны быть промыты раствором пищевой соды, а затем дистиллированной водой и тщательно высушены. ■

Литература

1. Рабочий электролит для конденсатора, способ его приготовления и алюминиевый конденсатор с таким электролитом. Патент

России № 2358348, H01G9/-35, 2006. ОАО «Завод “Элеконд”».

2. Conductive electrolyte system with viscosity reducing co-solvents. US Patent No. 6744619, H01G 9/42, 2004. Pacesetter, Inc.
3. Гуревич В. И. Вторичные источники электропитания: анатомия и опыт применения // Электротехнический рынок. 2009. № 1.
4. АДПК.673541.011 ТУ. Конденсаторы оксидно-электролитические алюминиевые К50-75.
5. IEC 60384-4-1 Fixed capacitors for use in electronic equipment. Part 4-1: Blank detail specification — Fixed aluminum electrolytic capacitors with non-solid electrolyte. Assessment level EZ.