

В публикации [1] были рассмотрены вопросы преодоления наступающего кризиса в поставках многослойных керамических конденсаторов. В качестве замены для применения в DC/DC-преобразователях предложено более широкое использование в той или иной комбинации миниатюрных алюминиевых электролитических конденсаторов.

## Надежность электролитических конденсаторов с учетом реальных условий эксплуатации РЭА

Владимир Рентюк, г. Запорожье

Однако за рамками статьи [1] остался такой важный вопрос, как надежность таких конденсаторов, оценка которой крайне важна для критических приложений и аппаратуры долговременного использования, например, промышленного назначения. Здесь, как известно, все должно работать, как швейцарские часы – долго и безотказно, причем зачастую в жестких условиях, характерных для промышленной среды. Так что надежность электролитических конденсаторов должна рассматриваться в зависимости от реальных условий применения.

Кроме привычных всем электрических характеристик, каждое изделие радиоэлектроники (РЭА) обладает таким специфическим свойством как надежность. В общем понимании надежность – это свойство изделия сохранять во времени, в установленных пределах, значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Надежность изделия в целом определяется характеристиками надежности входящих в него элементов, а именно их интенсивностью отказов. Надежность изделия, если его рассматривать, как последовательность элементов, можно охарактеризовать интенсивностью отказов системы, сведенной к эквивалентному элементу с интенсивностью отказов равной  $\lambda_0$ . В этом случае мы имеем:

$$\lambda_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

где:

- $\lambda_i$  – интенсивность отказов  $i$ -го элемента;
- $n$  – общее количество последовательных элементов.

В современных спецификациях параметр надежности элемента, который не поддается ремонту, будет представлен не интенсивностью отказов  $\lambda_i$ , а его наработкой до отказа – то есть, наработкой от начала эксплуатации до возникновения его отказа – МТТФ (среднее время до отказа – англ. *Mean (operating) time to failures*). Параметры  $\lambda_i$  и МТТФ= $T_i$ , взаимосвязаны  $T_i=1/\lambda_i$ . В англоязычной технической литературе вместо  $\lambda$  часто используется единица вероятной интенсивности отказов электронных компонентов FIT (Failure In Time). 1 FIT равен одному отказу за 1 млрд. час.



И здесь нужна одна оговорка – эта формула справедлива в устоявшемся режиме, когда время начальной повышенной интенсивности отказов прошло, а время конечной повышенной интенсивности отказов не наступило. И не забываем, что «отказ» здесь подразумевается гарантированный. Поскольку конденсатор – это устройство не восстанавливаемое, то это просто среднее время, которое он проработает в устройстве до того момента, как он выйдет из строя, а до этого его отказ может происходить с той или иной вероятностью, о чем многие, увидев в спецификации МТТФ в тысячах часов, успокаиваются. Как известно из теории надежности, кривая отказов имеет вид приведенные на [рис.1](#).

Участок «а» – это начальный период отказов, вызванный несовершенством конструкции и ошибками при производстве. Фактически это производственный брак. Партии таких элементов отсеиваются при стрессовых испытаниях и выборочном контроле.

Участок «b» – горизонтальная часть кривой, это период, когда вероятность отказа примерно постоянна. Длительность этого периода и есть, собственно, МТТФ. Но производитель для страховки в спецификации часто указывает половину этого времени.

Участок «с» – после окончания срока МТТФ, кривая демонстрирует увеличение вероятности отказов. Имеются

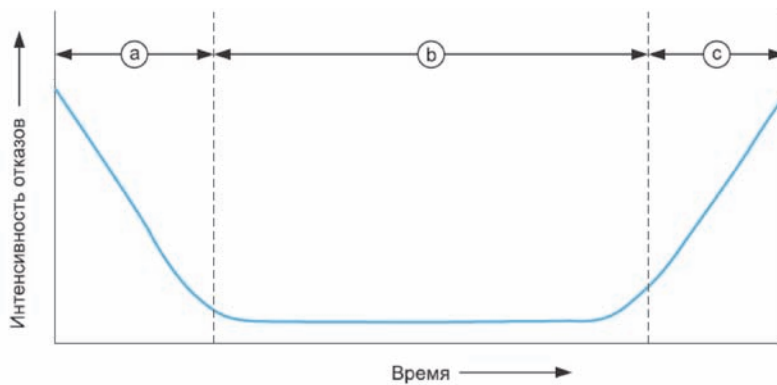


Рис.1

ввиду не только отказа элемента как таковой, но и отклонение параметров изделия от заявленных. Это увеличение вероятности отказа обусловлено тем, что элемент достигает своего жизненного предела из-за конструктивных особенностей, например, из-за примененных материалов, или технологии изготовления, т.е. наступает его технологический износ.

Как видно из вышеприведенной формулы интенсивность отказов системы будет определяться интенсивностью отказов элементов с самыми малыми временами МТТФ. Какой же из элементов может быть наиболее критическим? Сейчас мы видим резкий рост надежности полупроводников и большинства пассивных элементов, значительно улучшилось качество и, как следствие, надежность пайки, хотя тут появились искусственные проблемы, я имею ввиду мировую авантюру с отказом от свинца в припоях под названием Директива RoHS [2]. Анализ показывает, что в современной аппаратуре на одно из определяющих общую надежность изделия мест вышли электролитические конденсаторы.

Конечно, современные электролитические конденсаторы, это уже далеко не те чудеса советской промышленности, типа незабываемых К50-6 Ереванского завода «Нейрон». Сейчас это достаточно надежные элементы, но все же, в этом качестве они уступают, причем значительно, не только обычным конденсаторам и резисторам, но и полупроводниковым приборам. При сопоставимых условиях эксплуатации, электролитические конденсаторы имеют разный ресурс, который определяется их конструктивными особенностями. Но самые распространенные в настоящее время недорогие алюминиевые электролитические конденсаторы при температуре 85°C имеют ресурс от 8 до 25 тысяч часов работы. Конечно, имеются и более надежные электролитические конденсаторы — алюминиевые с максимальной рабочей температурой в 105°C.

Принцип работы, первоначально положенный в основу электролитического конденсатора со времени его изобретения, так и остался неизменным. Он заключается в использовании двух электродов (анода и катода) разделенных тонким непроводящим электрический ток оксидным слоем. Именно из-за малой толщины оксидного слоя и достигается большая удельная емкость конденсатора, и именно это является одним из его слабых мест. Для обеспечения минимального расстояния между обкладками конденсатора использовался токопроводящий электролит. Отсюда и их название, хотя в

конструкции ряда современных конденсаторов сам принцип работы остался, но жидкий электролит уже не используется, он заменен гелем или твердым диэлектриком.

Второе слабое место электролитических конденсаторов с условно «жидким» электролитом — это нарушения герметизации вследствие чего происходит его высыхание. При этом эффективное расстояние между катодом и анодом увеличивается, емкость конденсатора резко падает, что приводит к отказу аппаратуры. Не забываем, что для инженера «отказом» является не только полное прекращение функционирования изделия,

но и выход его параметров за нормы его спецификации.

От этого недостатка свободны «сухие» электролитические конденсаторы с вязким электролитом и твердотельные электролитические конденсаторы с полимерным диэлектриком. Последние представляют собой твердотельные конденсаторы, в которых вместо традиционного жидкого электролита применяется специальное органическое вещество — токопроводящий полимер или полимеризованный органический полупроводник [1].

Если говорить в общем, то область применения электролитических конденсаторов обширна. Трудно найти электронное, радиотехническое или электротехническое оборудование без их применения. Первые электролитические конденсаторы использовались в телеграфии и в качестве пусковых конденсаторов однофазных двигателей переменного тока, хотя большинство электролитических конденсаторов предназначены и используются исключительно в цепях постоянного или пульсирующего тока. Основных областей применения электролитических конденсаторов три.

*Первая* — это использование в цепях питания. Их назначение, быстрое (в отличие от аккумуляторов) накопление некоторого количества энергии с последующей ее отдачей в течение определенного времени, предотвращения просадок в цепях питающего напряжения, фильтрация и подавление помех.

*Вторая* — это разделительные конденсаторы в сигнальных цепях. Их задача выделение переменной составляющей из исходного сигнала с некоторым уровнем смещения по постоянному напряжению. Здесь в основном применяются алюминиевые конденсаторы, так как они обладают самоэкранированием, вследствие чего, они менее подвержены влиянию внешних электромагнитных помех. Кроме того, они обладают и меньшим уровнем собственных шумов, по отношению к другим типам электролитических конденсаторов, однако некоторым их типам свойственны шумы типа 1/f.

*Третья область применения* — это использование электролитических конденсаторов в качестве частотозадающих элементов в низкочастотных и особенно инфранизкочастотных генераторах, а также в качестве времязадающих элементов простейших таймеров с длительными интервалами времени. Здесь предпочтительнее конденсаторы с малыми токами утечки. А вот в таких устройствах, как низкочастотные фильтры выше второго порядка электролитические конденсаторы практически не применяются. Причина — присущие им большие

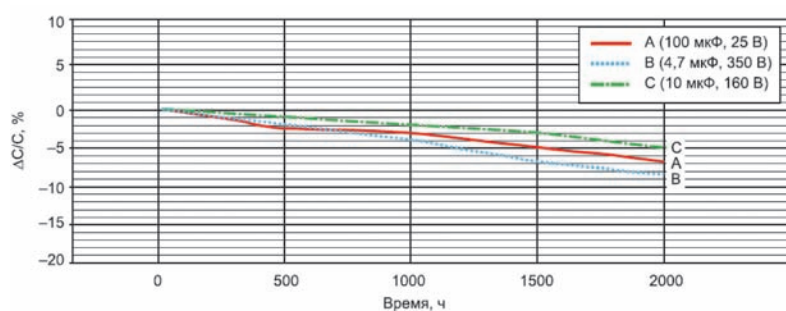


Рис.2

отклонения от номинального значения, обычно,  $\pm 20\%$  и более и деградация емкости от времени наработки, обусловленные технологией изготовления и особенностями конструкции (рис.2 см. [3]).

Область использования большинства электролитических конденсаторов ограничивается частотами до 150 кГц. Это связано с особенностями их конструкции. К тому же более высокие частоты, как правило, не требуют использования конденсаторов столь больших емкостей. Основная причина, ограничивающая использование электролитических конденсаторов, – это то, что его полное сопротивление не является чисто емкостным, а носит комплексный характер. Упрощенная эквивалентная схема конденсатора показана на рис.3.

Так как индуктивная составляющая для большинства современных малогабаритных конденсаторов технологии монтажа на поверхность (SMD) на их рабочих частотах ничтожно мала и составляет наногенри, то импеданс обычно определяется выражением  $Z(\omega) = R + jX(\omega)$ . Сопротивление, входящее в формулу это и есть ESR. Величина ESR в зависимости от типа конденсатора и его емкости, может достигать величин от миллиом для полимерных электролитических конденсаторов типа Low-ESR и до десятков Ом для дешевых алюминиевых электролитических конденсаторов малой емкости.

### Параметр ESR

Именно ESR интересует нас с точки зрения надежности. Оно равно сумме трех сопротивлений  $R_0 + R_d + R_e$ , где:

$R_0$  – это неизменяемое постоянное сопротивление равное 10 мОм [3];

$R_d$  – это зависящее от частоты сопротивление диэлектрического слоя

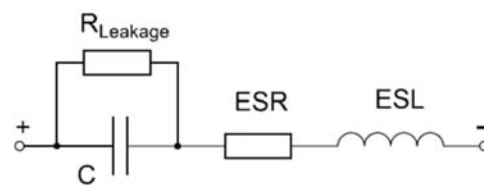
$$R_d(f) = \frac{tg\delta}{2\pi fC}$$

(где:  $tg\delta$  – потери,  $f$  – частота,  $C$  – фактическая, а не номинальная, емкость конденсатора);

$R_e$  – это, зависящее от температуры, сопротивление раствора электролита в комбинации с сепаратором и может быть оценено по реальной внутренней температуре конденсатора относительно его известного значения при температуре 25°C по формуле:

$$R_e(T) = R_e(25^\circ\text{C}) \times 2^{-\left[\frac{T-25}{A}\right]^B}$$

В состав этой формулы входят два параметра A и B, со-



ESL – эквивалентная последовательная индуктивность;  
ESR – эквивалентное последовательное сопротивление;  
R<sub>Leakage</sub> – сопротивление тока утечки;  
C – идеальный конденсатор емкостью C

Рис.3

гласно [3] их типовые значения для электролитических конденсаторов с электролитами на основе этилен гликоля составляют соответственно 40 и 0.6.

### В чем проблема ESR?

Проблема вытекает из физики, а именно из закона Джоуля-Ленца. Закон гласит – при прохождении электрического тока по проводнику количество тепла, выделяемого током в проводнике, прямо пропорционально силе тока, взятой во второй степени, величине сопротивления проводника и времени действия тока. Так что пульсирующий ток приводит к выделению тепла, которое пропорционально сопротивлению. Далее в действие вступает закон уже из области химии, а именно Закон (или Уравнение) Аррениуса, который устанавливает зависимость константы скорости k протекания химической реакции от роста температуры  $\Delta T$ . В нашем случае – это определяет скорость старения изоляции и деградация изоляционного слоя электролитического конденсатора. Это ведет к увеличению тока утечки или пробоя. И то и другое рассматривается, как отказ. Чтобы представить, что такое «изоляция» в электролитическом конденсаторе посмотрите на изображение анодной фольги, приведенное на рис.4.

Отказом будет также недопустимое снижение емкости и рост тангенса угла потерь. Он увеличивается пропорционально времени наработки и, поскольку они связаны, с ростом упомянутым выше ESR. Необходимо учитывать, что ESR имеет зависимость от температуры, частоты и наработки. Эта зависимость разная для разных типов конденсаторов. Как правило, при уменьшении температуры ESR увеличи-

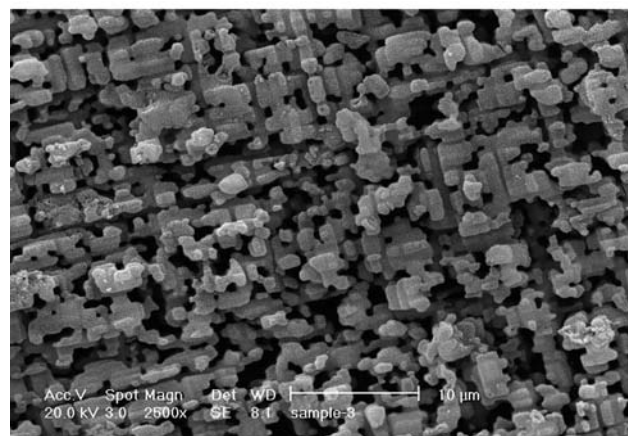


Рис.4

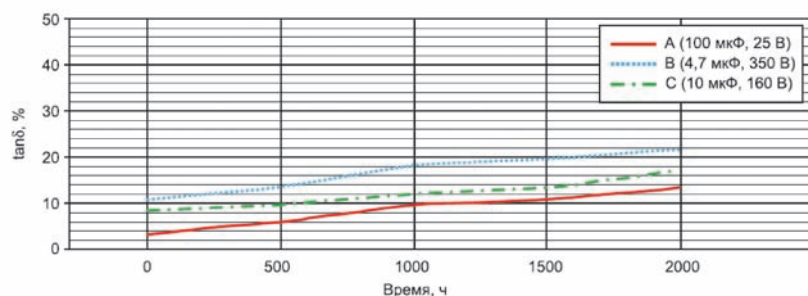


Рис.5

ваеся, при увеличении частоты – асимптотически уменьшается до некоторого предельного значения. Увеличение ESR приводит к повышению рассеиваемой мощности конденсатором, повышением его внутренней температуры и деградации параметров, а, применительно к DC/DC-преобразователям, к росту пульсаций и нарушениям их должного функционирования.

График, показывающий изменение тангенса угла потерь для типовых алюминиевых электролитических конденсаторов, показан на рис.5.

Важным условием для правильного использования электролитических конденсаторов и обеспечения заданной надежности является соблюдение несколько простых правил. Во-первых, все электролитические конденсаторы, предназначенные для работы в цепях постоянного тока, как полярные, так и неполярные, – требуют обязательного наличия поляризирующего напряжения. Игнорирование этого фактора – ха-

рактерная ошибка даже опытных разработчиков. Отсутствие или недостаток поляризирующего напряжения приводит не только к сокращению срока службы, это может привести к короткому замыканию из-за разрушения изолирующего оксидного слоя и отказу конденсатора. Допустимый уровень пульсаций или допустимая величина переменного напряжения по отношению к напряжению поляризации определяется по спецификации для каждого конкретного применения.

Необходимо учитывать, что большинство электролитических конденсаторов не предназначены для работы в условиях постоянно повторяющихся полных циклов заряда-разряда. Еще одна тонкость в использовании электролитических конденсаторов, заключается в том, что после длительного хранения электролитических конденсаторов для восстановления их параметров может потребоваться «насиленная» поляризация номинальным напряжением от внешнего источника напряжения перед их установкой на печатную плату. Автор статьи столкнулся с таким на практике, когда вдруг частота внутреннего генератора у новой партии отлаженных серийных изделий резко изменилась. Причина устранена именно кратковременной электротренировкой электролитических (в этом конкретном случае – танталовых) конденсаторов, которые имели длительный срок хранения на складе.

(Продолжение следует)

## СУХИЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ



- Сухие распределительные трансформаторы с литой изоляцией мощностью от 16 до 25 000 кВА
- Трансформаторы типа TTR-D напряжением 35/10 кВ и 35/0,4 кВ
- Специальная серия трансформаторов Eсо +P для альтернативной энергетики
- Трансформаторы преобразовательные, а также специального исполнения
- Печные трансформаторы

Компания СЭА - официальный дистрибьютор SEA SpA в Украине



PROVIDING  
INNOVATION  
SINCE 1990

Украина, 02094, г. Киев, ул. Краковская, 13-Б  
тел.: +38 044 291-00-41, факс: +38 044 291-00-42  
info@sea.com.ua, www.sea.com.ua