

Зависимость времени наработки на отказ электролитических конденсаторов от реальных условий их эксплуатации

Ольга СИНЯКОВА
 olga.sinyakova@ptelectronics.ru
Владимир РЕНТЮК
 rvk.modul@gmail.com

В статье рассматриваются вопросы, связанные с особенностями конструкции и применения электролитических конденсаторов различных типов, в частности приведена методика расчета времени наработки до отказа (МТТФ) электролитических конденсаторов в зависимости от реальных условий их 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 рассма-

тривать как последовательность элементов, можно охарактеризовать интенсивностью отказов системы, сведенной к эквивалентному элементу с интенсивностью отказов, равной λ_0 . В этом случае мы имеем:

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

где λ_i — интенсивность отказов i -го элемента; n — общее количество последовательных элементов.

В современных спецификациях параметр надежности элемента, который не поддается ремонту, будет представлен не интенсивно-

стью отказов λ_p , а его наработкой до отказа — то есть наработкой от начала эксплуатации до возникновения первого отказа — МТТФ (Mean (operating) time to failures — «среднее время до отказа»). Параметры λ_i и $MTTF = T_i$ взаимосвязаны: $T_i = 1/\lambda_i$. Но здесь нужна одна оговорка: эта формула справедлива в устойчивом режиме, когда время начальной повышенной интенсивности отказов прошло, а время конечной повышенной интенсивности отказов не наступило. Как известно из теории надежности, кривая отказов имеет вид, приведенный на рис. 1.

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 [1]. 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

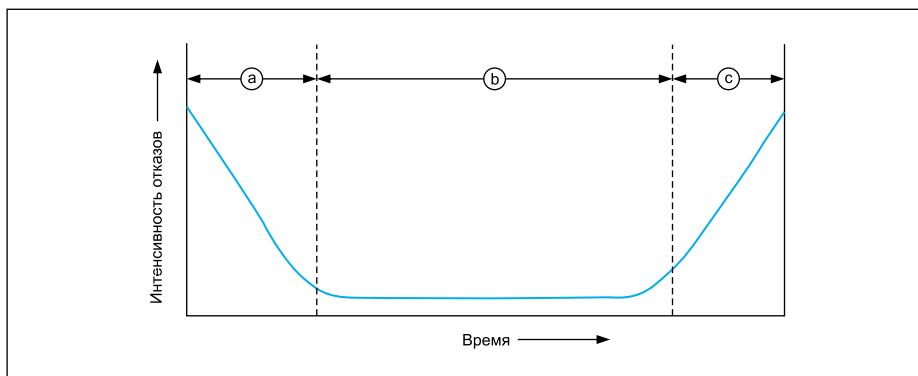


Рис. 1. Кривая интенсивности отказов [3]:
 а — начальный период отказов, вызванный несовершенством конструкции и ошибками при производстве (фактически это производственный брак; партии таких элементов отсеиваются при стрессовых испытаниях и выборочном контроле);
 б — горизонтальная часть кривой, это период, когда вероятность отказа примерно постоянна (длительность этого периода и есть, собственно, МТТФ, но производитель для страховки в спецификации часто указывает половину этого времени);
 в — после окончания срока МТТФ кривая демонстрирует увеличение вероятности отказов (имеется в виду не только отказ 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, то есть наступает его технологический износ)



Рис. 2. Два электролитических конденсатора 1930-х годов (8 мкФ, 525 В)
(источник: Ozguy89, English language Wikipedia)

ресурс, который определяется их конструктивными особенностями. Но самые распространенные в настоящее время недорогие алюминиевые электролитические конденсаторы при температуре +85 °С имеют ресурс от 2000 до 5000 ч работы. Конечно, есть и более надежные электролитические конденсаторы: алюминиевые с максимальной рабочей температурой в +125 °С, танталовые — с типовым МТТФ 100 000 ч или ниобиевые с МТТФ от 200 000 до 500 000 ч. Но здесь возникает вопросы цены по отношению к емкости конденсатора и общей целесообразности.

Действительно, нет смысла в недорогие устройства с коротким жизненным циклом ставить сверхнадежные и, следовательно, более дорогие конденсаторы. Скорость смены поколений аппаратуры сейчас высока как никогда, и большинство изделий электроники максимум через три-пять лет окажется на свалке, так как будет заменено изделиями нового поколения. Пример тому — огромные скопившиеся, несмотря на все маркетинговые ухищрения, запасы морально устаревших и потому нераспроданных телевизоров, позиционировавшихся как HD ready, компьютеров, ноутбуков и мобильных телефонов. Кстати, по некоторым данным, непроданные запасы мобильных телефонов составляли в 2013 году уже 800 млн. Вот почему, в частности, на материнских платах компьютеров широкого применения уже не встретишь ниобиевые конденсаторы, столь популярные в этих устройствах еще 15 лет назад. А вот доля использования алюминиевых конденсаторов, несмотря на их более низкую надежность, повышается.

Что же представляет собой электролитический конденсатор и каковы его параметры, которые оказывают влияние на его надежность? История электролитических конденсаторов началась с открытия в 1896 году принципа его работы, сделанного «польским Эдисоном» Каролом Поллаком (Karol Pollak), а первый патент на электролитический конденсатор на основе алюминиевой фольги и тетрабората натрия был получен уже в 1897 году. Но наибольшее свое развитие электролитические конденсаторы получили

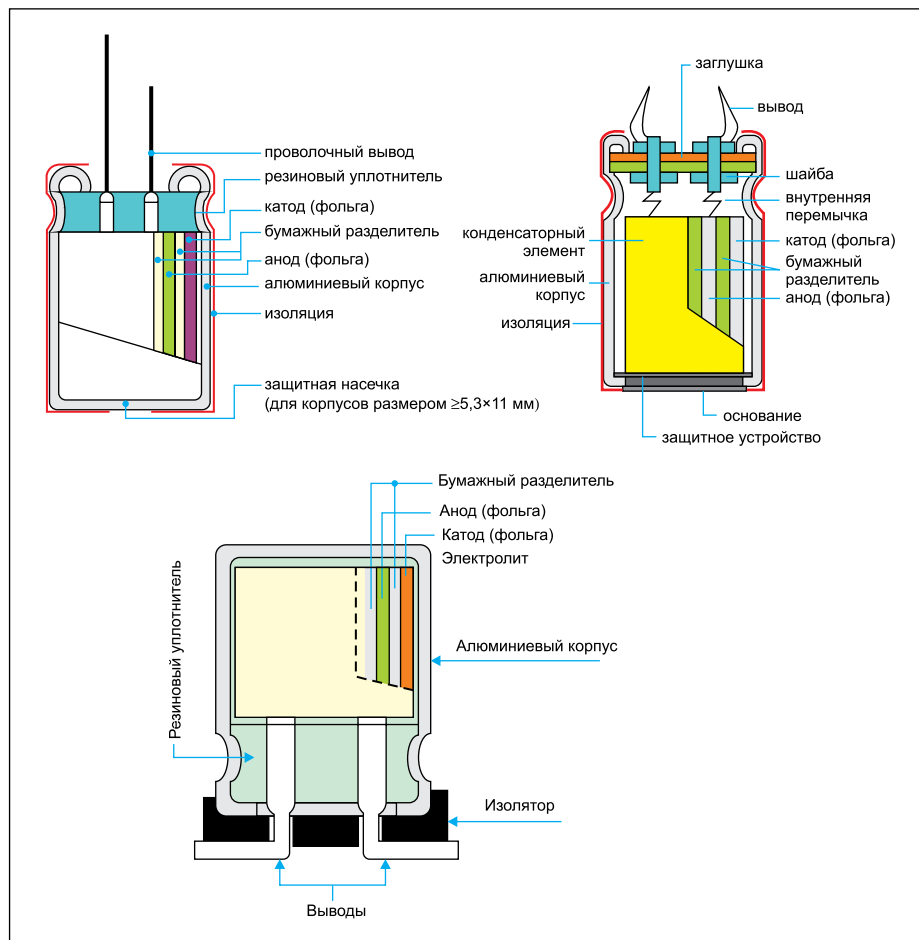


Рис. 3. Варианты исполнения алюминиевых электролитических конденсаторов [3]

уже в XX веке (рис. 2) с развитием сначала радиотехнической, а потом и электронной отраслей промышленности, для которых они стали незаменимым и широко используемым компонентом.

Принцип работы, первоначально положенный в основу электролитического конденсатора, остался неизменным. Он заключается в использовании двух электродов (анода и катода), разделенных тонким, не проводящим электрический ток оксидным слоем. Для обеспечения минимального расстояния между обкладками конденсатора применялся токопроводящий электролит. Отсюда и их название, хотя в конструкции ряда современных конденсаторов сам принцип работы остался, но жидкого электролита уже нет. Именно из-за малой толщины оксидного слоя и достигается большая удельная емкость конденсатора, и именно это является одним из его слабых мест.

В некоторых типах конденсаторов в качестве электродов предусмотрена алюминиевая фольга (катанная или чаще пористая). В других конденсаторах, для увеличения их удельной емкости, анод выполняется объемно-пористым из спрессованного под действием высокой температуры металлического порошка. Пористые аноды имеют большую активную поверхность и, следо-

вательно, обеспечивают большую удельную емкость конденсатора, они более технологичны, но и дороже, чем ленточные фольговые.

Как уже отмечалось, для обеспечения максимально близкой электрической связи между обкладками конденсатора используется электролит (рис. 3). Это второе слабое место, поскольку из-за нарушения герметизации (самая частая проблема «советских» конденсаторов) происходит его высыхание, эффективное расстояние между катодом и анодом увеличивается и емкость конденсатора резко падает.

Этого недостатка лишены «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 (рис. 4).

Еще существуют оксидно-полупроводниковые конденсаторы — в них электроды разделены токопроводящим оксидом марганца.

Различают конденсаторы и по материалу анода, для которого, кроме наиболее часто используемого алюминия, применяются тантал, реже ниобий, активированный уголь или углеродные нанотрубки.

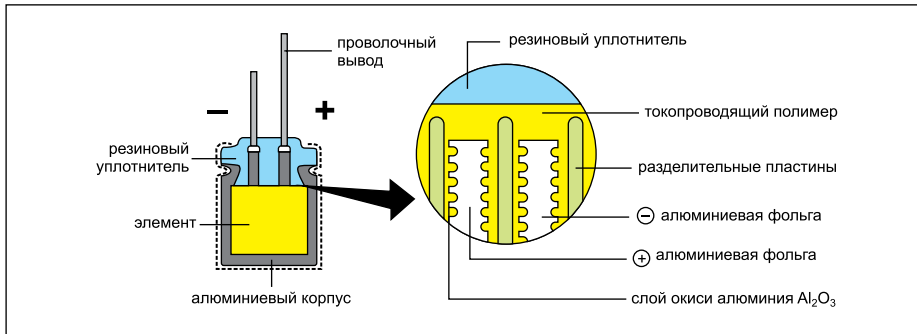


Рис. 4. Конденсатор с твердым электролитом

Отдельной группой электролитических конденсаторов являются ионисторы, или суперконденсаторы, чья емкость измеряется уже в сотнях и тысячах фарад. Это двухслойные электрохимические конденсаторы, представляющие собой гибриды конденсатора и химического источника тока. Ведутся также работы по созданию суперконденсаторов на основе графена, которые будут иметь удельную энергетическую емкость, соизмеримую с аккумуляторами.

Для максимального удовлетворения требований проектировщиков РЭА электролитические конденсаторы выпускаются в самых разнообразных конструктивных исполнениях. Доступны электролитические конденсаторы:

- цилиндрические (обычно это алюминиевые конденсаторы);
- в форме параллелепипеда (на техническом жаргоне — прямоугольные, чаще это танталовые и полимерные конденсаторы);
- с однонаправленными и радиальными выводами;
- в каплевидном корпусе (танталовые и ниобиевые);
- безвыводные для монтажа на поверхность (SMD, surface-mount device);
- дисковые с установкой в держатели (обычно это касается ионисторов);
- с винтовыми выводами (обычно это высоковольтные или мощные конденсаторы большой емкости) и т. д.

Область применения электролитических конденсаторов обширна. Трудно найти элек-

тронное, радиотехническое или электротехническое оборудование, где они не используются. Первоначально электролитические конденсаторы применялись в телеграфии и в качестве пусковых конденсаторов однофазных двигателей переменного тока, хотя большинство электролитических конденсаторов предназначено исключительно для цепей постоянного или пульсирующего тока. Сейчас существует три основные области применения электролитических конденсаторов:

1. Использование в цепях питания. Их назначение: быстрое (в отличие от аккумуляторов) накопление некоторого количества энергии с последующей ее отдачей в течение определенного времени, предотвращение просадок в цепях питающего напряжения, фильтрация и подавление помех. Здесь находят применение все типы электролитических конденсаторов, но танталовые предпочтительнее для импульсных источников питания ввиду их более высоких рабочих частот, кроме того, тут важную роль играет такая характеристика конденсаторов, как ESR.
2. 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

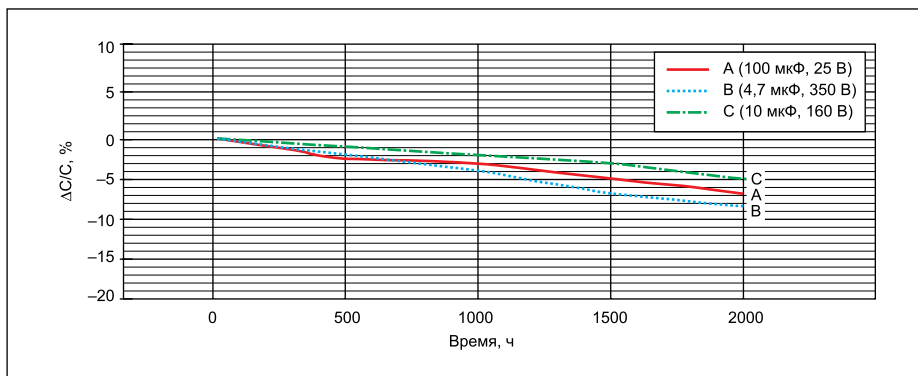


Рис. 5. График деградации емкости электролитических алюминиевых конденсаторов [3]

уровнем собственных шумов по отношению к другим типам электролитических конденсаторов. Хотя в некоторых источниках и есть указание на свойственный им увеличенный уровень шумов типа $1/f$, это не совсем так. Это относится к старым, еще советским конденсаторам, и то по причине их низкого качества.

3. Использование электролитических конденсаторов в качестве частотоподающих элементов в низкочастотных и особенно инфранизкочастотных генераторах, а также в качестве времязадающих элементов 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 отклонения от номинального значения, обычно $\pm 20\%$ и более, и деградация емкости от времени наработки, обусловленные технологией изготовления и особенностями конструкции (рис. 5).

Область применения большинства электролитических конденсаторов ограничивается частотами до 150 кГц. Это связано с особенностями их конструкции. К тому же более высокие частоты, как правило, не требуют конденсаторов столь больших емкостей. Основная причина, ограничивающая использование электролитических конденсаторов, — то, что его полное сопротивление не является чисто емкостным, а носит комплексный характер. Упрощенная эквивалентная схема конденсатора показана на рис. 6.

Поскольку для большинства современных конденсаторов индуктивная составляющая на их рабочих частотах ничтожно мала (особенно у танталовых [2]) и составляет наногенри, то импеданс обычно определяется выражением:

$$Z(\omega) = R + jX(\omega).$$

Сопротивление, входящее в формулу, называется ЭПС — эквивалентное последовательное сопротивление, или, как это принято в современной технической литературе и большинстве спецификаций, — ESR (Equivalent Series Resistance). Значение ESR в зависимости от типа конденсатора и его емкости может достигать величин от миллиом для полимерных танталовых электролитических конденсаторов типа Low-ESR до десят-

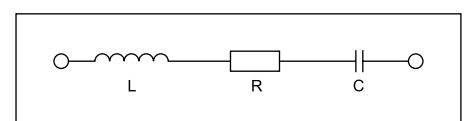


Рис. 6. Упрощенная эквивалентная схема конденсатора: C: емкость, Ф; R: эквивалентное последовательное сопротивление, Ом; L: эквивалентная последовательная индуктивность, Гн

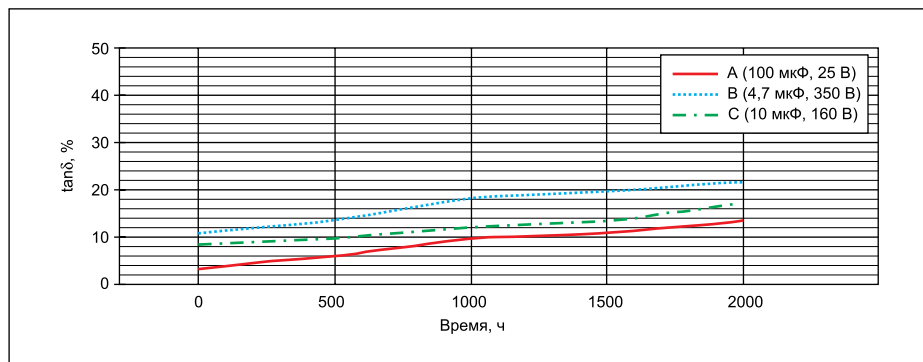


Рис. 7. График увеличения потерь в электролитических алюминиевых конденсаторах [3]

ков Ом для дешевых алюминиевых электролитических конденсаторов малой емкости.

Как и для всех конденсаторов, основным параметром электролитических конденсаторов является их емкость. Кроме емкости, электролитические конденсаторы характеризуются номинальным рабочим напряжением, током утечки, максимальной рабочей частотой, диапазоном рабочих температур, тангенсом угла потерь (увеличивается пропорционально времени наработки) и упомянутым выше ESR. Тангенс угла потери и ESR (эквивалентное последовательное сопротивление, Ом) связаны между собой выражением:

$$ESR = \frac{\tan \delta}{2\pi f ESC},$$

где ESC (Equivalent Series Capacitance) — эквивалентная последовательная емкость, Ф; f — частота, Гц.

Необходимо учитывать, что ESR имеет зависимость от температуры, частоты и наработки. Эта зависимость разная для разных типов конденсаторов. Как правило, при уменьшении температуры ESR увеличивается, при увеличении частоты — асимптотически уменьшается до некоторого предельного значения. Увеличение ESR приводит к повышению рассеиваемой мощности конденсатором, повышению его внутренней температуры и деградации параметров. График, показывающий изменение тангенса угла потерь для типовых алюминиевых электролитических конденсаторов, показан на рис. 7. Для получения большей информации обратитесь к каталогу [3].

Важным условием для правильного использования электролитических конденсаторов и обеспечения заданной надежности является соблюдение нескольких 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 — характерная ошибка даже опытных разработчиков, пример приведен в [4]. Отсутствие или недостаток поляризирующего напряжения приводит не только к сокращению срока его службы, это может вы-

звать короткое замыкание из-за разрушения изолирующего оксидного слоя и отказ конденсатора и изделия в целом. 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 предназначено 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 «насильственная» поляризация номинальным напряжением от внешнего источника напряжения перед их установкой на печатную плату. Автор статьи столкнулся с этим на практике, когда вдруг частота внутреннего генератора у новой партии отлаженных серийных изделий резко изменилась. Причина была устранена именно кратковременной электротренировкой электролитических танталовых конденсаторов, которые долго хранились на складе. И как уже отмечалось, крайне важно учитывать условия эксплуатации, а именно температуру. Здесь требуется уточнение: частой ошибкой разработчиков

является неправильный учет такого параметра, как температура окружающей среды. Для элемента «окружающей средой» будет именно та среда, в которой он находится в данной конструкции, а не та среда, в которой эксплуатируется оборудование, поэтому элемент, а в рассматриваемом случае это электролитический конденсатор, может нагреваться от рядом расположенных элементов (рис. 8) [5].

Что касается такой важной характеристики, как надежность, здесь нельзя слепо учитывать указанный в спецификации MTTF, а нужно (как уже отмечалось) оценивать этот параметр в каждом конкретном применении. Такой подход не является чем-то новым и необычным. Еще в 80-х годах прошлого столетия тогда еще в ленинградском ВНИИРПА им. А. С. Попова были проведены работы по повышению надежности бытовой радиоаппаратуры, основной итог которых — введение понятия «эксплуатационная наработка на отказ» [6]. До этого оценка времени безотказной работы ограничивалась простым учетом ряда коэффициентов нагрузки элементов. В руки разработчиков была дана методика, позволяющая более точно оценить время безотказной работы устройства на этапе проектирования и принять меры по его повышению. Автор статьи принимал участие в этих работах в части уточнения методики и ее внедрения.

В [5] приведена усовершенствованная методика оценки влияния на надежность условий эксплуатации именно для наименее надежных в современной аппаратуре элементов — электролитических конденсаторов. Предлагается рассматривать проблему комплексно по нескольким основным формулам вычисления срока службы. При расчетах необходимо принимать во внимание, что максимальный срок службы в любом случае будет ограничен 15 годами (что составляет 131 400 ч). Причина — деградация изоляционных материалов.

Следующая формула позволяет провести оценку срока службы в зависимости от нагрузки конденсатора [5]:

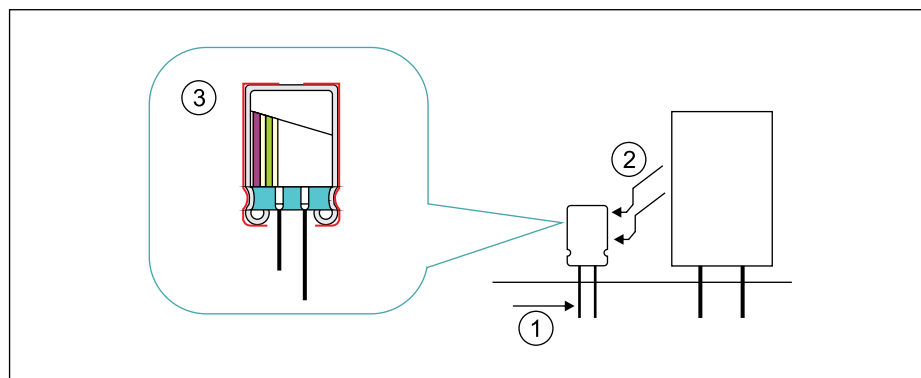


Рис. 8. Факторы, влияющие на нагрев конденсатора:

- 1 — фактор теплопроводности (передача тепла по проводнику печатной платы);
- 2 — влияние инфракрасного излучения от рядом расположенных нагретых элементов;
- 3 — нагрев элемента из-за внутренних потерь мощности на собственном сопротивлении конденсатора (мощность потерь для переменной составляющей определяется как I^2R , а для постоянной составляющей IR)

$$L_x = L_0 \times 2^{\left(\frac{T_0 - T_x}{10}\right)} \times K^{\left(\frac{-\Delta T_x}{5}\right)},$$

где $\Delta T_x = \Delta T_0 \times (I_x/I_0)^2$, если $I_x > I_0$, то $K = 4$; если $I_x \leq I_0$, то $K = 2$; L_x — расчетный срок службы при фактической рабочей температуре, ч; L_0 — срок службы при максимально допустимой рабочей температуре, ч; T_0 — максимально допустимая рабочая температура, °C; T_x — фактическая температура окружающей среды, °C; $\Delta T_0 \leq 5$ °C — максимально допустимое повышение температуры применительно к I_0 ; I_x — фактический ток пульсаций на рабочей частоте f_0 , mA; I_0 — расчетный максимально допустимый ток пульсаций, умноженный на коэффициент частоты по отношению к частоте f_0 , A. Для расчета тока пульсаций поправка на коэффициент, учитывающий температуру, не требуется.

Примечание. Во всех приведенных формулах значение тока и напряжения, кроме случаев, оговоренных особо, понимается как среднеквадратическое.

В качестве примера выполним расчет ожидаемого срока службы для миниатюрных конденсаторов общего применения серии SH [3]. Расчет приведен в таблице 1.

Таблица 1. Пример расчета ожидаемого срока службы

Номинальная емкость, мкФ	Номинальное рабочее напряжение (V ₀), В	Серия	Коэффициент частоты (C _f)	Номинальные значения		Максимальный ток пульсаций (I ₀), А	Фактический ток пульсаций (I _x), А	Температура окружающей среды (T ₀), °C	Увеличение температуры при I _x (ΔT _x), °C	Расчетный срок службы (L _x)	
				Температуры (T ₀), °C	MTTF (L ₀), ч					ч	год
1000	6,3	SH	1	+105	2000	0,445	0,223	+60 +50	1,26	76 050	8,68

Из приведенного расчета видно, что уменьшение температуры окружающей конденсатор среды всего на 10 °C при прочих равных условиях приводит к двукратному повышению расчетного срока службы.

Как известно, большие амплитуды пульсаций тока сокращают срок службы электролитических конденсаторов [7]. Здесь сказывается влияние ESR. Следующая формула позволяет провести оценку срока службы в зависимости от уровня тока пульсаций конденсатора [5]:

$$L_x = L_r \times 2^{\left(\frac{T_0 - T_x}{10}\right)} \times K^{\left(\frac{\Delta T_0 - \Delta T_x}{5}\right)},$$

где L_r — срок службы в режиме пульсаций тока при максимально допустимой рабочей температуре, ч.

В качестве примера выполним расчет ожидаемого срока службы для низкоимпедансного конденсатора с увеличенным сроком службы серии SY [3]. Расчет приведен в таблице 2.

Таблица 2. Пример расчета ожидаемого срока службы в режиме пульсаций тока

Номинальная емкость, мкФ	Номинальное рабочее напряжение (V ₀), В	Серия	Коэффициент частоты (C _f)	Номинальные значения		Максимальный ток пульсаций (I ₀), А	Фактический ток пульсаций (I _x), А	Температура окружающей среды (T ₀), °C	Увеличение температуры при I _x (ΔT _x), °C	Расчетный срок службы (L _x)	
				Температуры (T ₀), °C	MTTF (L ₀), ч					ч	год
1000	6,3	SY	1	+105	4000	0,84	0,42	+70	3,2	58 081	6,63

Для конденсаторов с номинальным рабочим напряжением от 160 В и выше формула имеет несколько иной вид:

$$L_x = L_r \times k^{\left(\frac{T_0 - T_x}{10}\right)} \times k^{\left(\frac{\Delta T_0 - \Delta T_x}{5}\right)} \times \left(\frac{V_0}{V_x}\right)^{4,4},$$

где V_0 — номинальное рабочее напряжение, В; V_x — фактическое напряжение, В.

Примечание. V_x должно быть не менее чем 80% от V_0 .

В качестве примера выполним расчет ожидаемого срока службы для конденсатора общего применения серии LG [3]. Расчет приведен в таблице 3.

Таблица 3. Пример расчета ожидаемого срока службы высоковольтного конденсатора в режиме пульсаций тока

Номинальная емкость, мкФ	Рабочее напряжение, В		Серия	Коэффициент частоты (C _f)	Номинальные значения		Максимальный ток пульсаций (I ₀), А	Фактический ток пульсаций (I _x), А	Температура окружающей среды (T ₀), °C	Увеличение температуры при I _x (ΔT _x), °C	Расчетный срок службы (L _x)	
	V ₀	V _x			Температуры (T ₀), °C	MTTF (L ₀), ч					ч	год
1000	400	320	LG	1	+105	2000	1,4	0,7	+75	3,2	54 814	6,26

Вышеприведенные формулы описывали наработку на отказ для электролитических конденсаторов с жидким электролитом, для твердотельных полимерных конденсаторов формулы расчета иные [5]. В общем случае используется две упрощенные формулы:

$$L_x = L_e \times B^{\left(\frac{T_0 - T_x}{10}\right)} \times B^{\left(\frac{-\Delta T_x}{10}\right)}, \tag{1}$$

$$L_x = L_0 \times 10^{\left(\frac{T_0 - T_x}{20}\right)}, \tag{2}$$

где L_x — расчетный срок службы при фактической рабочей температуре, ч; L_e — фактический срок службы при указанной в спецификации рабочей температуре, ч; B — температурный фактор (=2); T_0 — максимальная рабочая температура, °C; T_x — фактическая температура окружающей среды, °C; ΔT_x — повышение температуры под действием пульсаций тока, °C; ΔT_0 — повышение температуры конденсатора на максимальном токе пульсаций при определенной в спецификации температуре (20 °C); I_x — фактический ток пульсаций, А; I_0 — максимально допустимый ток пульсаций, А.

В качестве примера выполним расчет ожидаемого срока службы для конденсаторов серии CG компании TEAPO. Расчет приведен в таблице 4.

Таблица 4. Пример расчета ожидаемого срока службы твердотельного конденсатора по формулам (1) и (2)

Номинальная емкость, мкФ	Номинальное рабочее напряжение (V ₀), В	Серия	Коэффициент частоты (C _f)	Максимальная температура (T ₀), °C	MTTF, ч	Максимальный ток пульсаций (I ₀), А	Фактический ток пульсаций (I _x), А	Температура окружающей среды (T ₀), °C	Увеличение температуры при I _x (ΔT _x), °C	Расчетный срок службы (L _x)	
										ч	год
220	6,3	CG	1	+105	15 000	1810	1200	+75	8,79	65 245	7,45
Расчет по формуле (2)											
220	6,3	CG	1	+105	2000			+75		63 246	7,22

Как можно видеть, разница в расчетах незначительная, но формула (2) несравненно проще, хотя и дает заниженный результат.

Что дает предложенная методика? Она предоставляет инженеру-разработчику инструмент, позволяющий не только оценить надежность своего будущего изделия на ранних этапах проектирования (еще на этапе НИИОКР) в реальных условиях его эксплуатации, но и избежать убытков заказчика при реализации изделий. Причем не только от недостаточной надежности, но и от избыточной. Поясню. Что советская школа требовала от инженера-разработчика? Одно из основных требований было повышение и повышение надежности. А что реально требуют современные рыночные условия? Позвольте высказать крамольное утверждение: рыночные условия требуют обеспечения той надежности, которая является целесоо-

бразной, и не более. Что имеется в виду? Естественно, что для некоторых групп изделий, таких как военная, аэрокосмическая техника, медицинское оборудование для поддержания жизни, оборудование для систем коммуникации, действительно необходимы высокие показатели надежности. От этого оборудования зависит жизнь людей. Здесь определение наработки на отказ является важным фактором для определения времени проведения регламентных работ, замены частей или изделий в целом, не дожидаясь их отказа. А что нужно для рынка изделий широкого применения, которым свойственна быстрая смена поколений? Здесь затраты на максимальное повышение надежности не то что неоправданны, они просто недопустимы, так как приводят не только к увеличению прямых затрат, но и к упущению экономической выгоды. Мало того, что применение элементов с повышенной надежностью предполагает удорожание изделия и, следовательно, снижение его конкурентоспособности, но и упущение выгоды из-за сокращения продаж новых изделий, изготовленных на его замену. Или вы хотите, чтобы ваши изделия пополнили те миллионы непроданных телевизоров и мобильных телефонов, о которых упомянуто в начале статьи? Есть в украинском языке часто используемая заимствованная польская поговорка: «Що занадто, то не здраво», аналогичная нашей «Все хорошо, что в меру». Это касается и переизбытка надежности для аппаратуры широкого применения. Современный, умеющий считать деньги заказчик должен требовать от разработчика обеспечить не максимальную, а именно заданную разумную надежность изделия при его проектировании и исходя из этого планировать выпуск изделий и их продажу. Вот здесь предложенная компанией TEAPO удобная методика определения срока службы элементов и становится незаменимой — грамот-

ный специалист легко делает переход от показателей надежности компонентов к характеристикам надежности изделия в целом.

Важные замечания по вопросам использования электролитических конденсаторов, которые будут весьма полезны разработчикам РЭА, приведены в [3, 5]. ■

Автор статьи благодарит компанию TEAPO за предоставленную информацию.

Компания TEAPO — специализированный тайваньский производитель электролитических и полимерных конденсаторов, стратегический партнер Yageo, Продукция отвечает сертификатам ISO/TS16949, AEC-Q200 (для автомобильной промышленности).

Литература

1. Рентюк В. RoHS-директива — защита экологии или рынков? // Технологии в электронной промышленности. 2013. № 5.
2. Моравик С., Зедничек Т. Сравнение характеристик танталовых и алюминиевых конденсаторов // Компоненты и технологии. 2000. № 8.
3. <http://www.teapo.com/WebSiteFile/Download/Catalog.pdf>
4. Рентюк В. Проектирование активных фильтров в системе WEBENCH Designer Center // Компоненты и технологии. 2014. № 2.
5. Aluminum Electrolytic Capacitor Introduction of Life Calculation Formula // TEAPO. February, 2014.
6. Справочный материал НИР «Надежность-84» ВНИИРПА им. А. С. Попова: Руководитель Дементьев В. В., № Гос. пер. У97903. Ленинград, 1984.
7. Mirsky G. Determining end-of-life, ESR, and lifetime calculations for electrolytic capacitors at higher temperatures // EDN. August 20, 2008.