

Алюминиевые электролитические конденсаторы Vishay для источников питания

Окончание, начало в «Вестнике электроники» №3, 2011

Андрей Самоделов

В прошлом номере «Вестника электроники» опубликована первая часть подробной статьи по применению электролитических конденсаторов в источниках питания, базирующейся на руководствах специалистов компании Vishay. Читайте заключительную часть, в которой приведены окончательные данные по выбору конкретных моделей конденсаторов при проектировании источника питания.

Номограммы

Проведя обширное тестирование и имея опыт длительного использования алюминиевых конденсаторов, компания Vishay разработала графический инструмент, который показывает соотношение между сроком службы алюминиевого конденсатора в устройстве и двумя факторами, оказывающими влияние на его температуру. Этот

инструмент, известный как номограмма срока службы, отображает зависимость описанного в первой части соотношения I_A/I_R от рабочей температуры (T_{amb}) алюминиевого конденсатора, отложенной по горизонтальной оси. На рис. 7 изображен пример такой номограммы.

В примере 2 показано, как можно использовать номограмму для выбора

алюминиевого конденсатора с необходимым номинальным пульсирующим током, а в примере 3 — как можно использовать номограмму при расчете необходимой спецификации для заданной эксплуатационной долговечности.

Как получить данные для вычисления пульсаций тока

Если на этапе разработки источника питания используется программа моделирования схем, то результат моделирования можно применить для получения среднеквадратичного значения пульсирующего тока. Если такая возможность недоступна, компоненты пульсирующего тока можно вычислить приближенно, используя, например, осциллограф, который может рассчитывать среднеквадратичное значение и спектр измеряемого сигнала. При этом необходимо учитывать следующее.

Токовый зонд при введении в схему оказывает малое влияние на пульсирующий ток в конденсаторе, но обычно имеет ограниченно низкую полосу пропускания и не может корректно измерить компоненты тока с частотой 100 Гц. Некоторые токовые зонды будут входить в насыщение, когда измеряемое значение выйдет за диапазон измерения, что приведет к неверным показаниям.

Резисторы с малой индуктивностью, такие как WSR от Vishay [2], можно подключить последовательно с конденсатором. Сопротивление такого резистора, чтобы не влиять на точность измерения высокочастотных компонент, должно быть меньше, чем значение эквивалентного последовательного

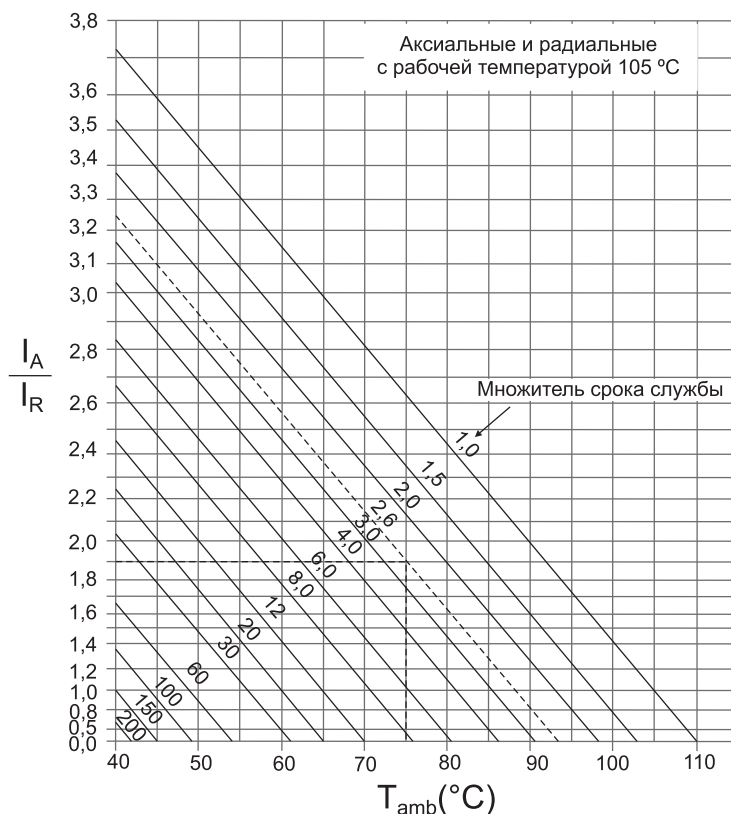


Рис. 7. Пример номограммы срока службы

сопротивления (ESR) конденсатора (например, 10 мОм). Подпайка коаксиального кабеля непосредственно к выводам резистора будет давать меньший вклад от интерференционных помех в измеряемый сигнал, чем использование токового зонда. Важно правильно подключить общую шину приложения к гнезду общей шины заземленного осциллографа. Необходимо избегать коротких замыканий и использовать развязывающий трансформатор для изоляции измерительного прибора от схемы.

Хорошей идеей может быть проверка того, что сумма среднеквадратичных значений компонент основной частоты от различных источников в частотной области близка к среднеквадратичному значению сигнала во временной области. Если это условие не выполняется, то все компоненты можно умножить на коэффициент, равный отношению среднеквадратичного значения во временной области к сумме среднеквадратичных значений в частотной области. Для сложения среднеквадратичных значений компонент с различными частотами необходимо использовать следующее уравнение:

$$I_{total} = (I_{f1}^2 + I_{f2}^2 + \dots + I_{fn}^2)^{1/2} \quad (9)$$

Нормированные среднеквадратичные значения можно использовать для подстановки в уравнение 7, чтобы найти значение параметра I_A/I_R , необходимого для определения множителя срока службы из номограммы.

Учет температуры и рассеяния тепла

Температурный рейтинг алюминиевого конденсатора указывает на максимальную температуру окружающей среды, при которой можно обеспечить заданную эксплуатационную долговечность при номинальном пульсирующем токе и номинальном напряжении. В действительности измеренная температура алюминиевого конденсатора может оказаться на 10 °C выше из-за эффекта нагрева пульсирующим током.

Температура окружающей среды, которая используется в номограмме, определяется документом IEC 60068 параграф 4.6.2 как температура в слое воздуха на таком расстоянии от конденсатора, на котором можно пренебречь

Пример 2. Использование номограммы для срока службы при расчете номинального пульсирующего тока

Источник питания

Выходное напряжение 5 В при непрерывном токе нагрузки 6 А, частота преобразования — 33 кГц. Температура внутри источника питания 75 °C, предполагаемый срок службы 3 года (=26 280 часов). Среднеквадратичное значение пульсирующего тока через конденсатор — 9 А. Для конденсаторов Vishay серии 150 RMI эксплуатационная долговечность составляет 10 000 часов. Следовательно, требуется множитель $26\,280/10\,000=2,6$.

Из рис. 7 видно, что для температуры окружающей среды +75 °C и коэффициента срока службы 2,6 должно выполняться условие $I_A/I_R \approx 1,9$. Коэффициент пульсаций тока K_f для 10-В конденсатора при частоте 33 кГц равен 1,0 (см. документацию и уравнение 7).

Поэтому алюминиевый конденсатор, стоящий на выходе блока питания, должен иметь номинальный пульсирующий ток:

$$I_R = (1/\text{множитель из номограммы}) \cdot (I_A/K_f) = (1/1,9) \cdot (9/1,0) = 4,7 \text{ А.}$$

Этот пульсирующий ток могут обслужить два алюминиевых конденсатора серии 150 RMI номиналом 4700 мкФ/10 В, соединенных параллельно.

сатора, на котором можно пренебречь эффектом рассеяния тепла. Однако измерение температуры окружающей среды внутри работающего источника питания может быть весьма затруднительным. В первом приближении можно

использовать измерение температуры корпуса алюминиевого конденсатора. Если эквивалентный пульсирующий ток приложения I_A больше, чем номинальный пульсирующий ток I_R алюминиевого конденсатора, то $I_A/I_R > 1$, и при-

Пример 3. Использование номограммы для срока службы при расчете необходимой спецификации для заданной эксплуатационной долговечности

Источник питания в телевизоре должен работать в течение 5 лет при ежедневном 8-часовом просмотре телепередач. Предположим, что максимальная температура воздуха внутри корпуса телевизора при просмотре телепередач составляет +60 °C, а в режиме ожидания +40 °C. При работе пульсирующий ток через конденсатор составляет 50% от максимально допустимого значения (то есть $I_A/I_R=1,5$).

Предположим, что используется конденсатор, характеристики которого изображены на рис. 7 (то есть алюминиевый конденсатор радиального типа с рабочей температурой +105 °C).

Тогда можно составить следующую таблицу (1 год=8760 часов):

	В годах	В часах	Множитель для срока службы (рисунок 7)	Долговечность алюминиевого конденсатора (в часах при 105 °C)
Рабочий режим, 60 °C, $I_A/I_R=1,5$	1,7	14 600	12	1217
Режим ожидания, 40 °C, $I_A/I_R=0,0$	3,3	29 200	200	146
Всего	5,0	43 800		1363

Чтобы соответствовать требованиям срока службы устройства, алюминиевый конденсатор должен иметь эксплуатационную долговечность >1363 часов при +105 °C.

ложение может вызвать существенный нагрев конденсатора. Чтобы убедиться, что вычисленный срок службы корректно отражает условия приложения, для оценки температуры окружающей среды необходимо использовать еще одну точку измерения.

Если нагрев электролитического конденсатора пульсирующим током такой, что невозможно обеспечить требуемый срок службы, то может потребоваться дополнительное охлаждение. В таком случае полезны следующие рекомендации.

Теплопередача за счет излучения.

Алюминиевые конденсаторы теряют значительное количество теплоты за счет излучения. Но поверхность, которая охлаждается за счет излучения, может быть столь же легко и нагрета тем же образом. Поэтому, чтобы предотвратить перегрев, алюминиевые конденсаторы не должны располагаться близко от нагреваемых элементов, таких как радиаторы или трансформаторы.

Теплопередача за счет конвекции.

Воздух быстро нагревается при обтекании горячего компонента. Если несколько одинаково нагруженных конденсаторов (например, включенные параллельно конденсаторы на выходе блока питания) охлаждаются с помощью вентилятора, то их лучше всего размещать в линию перпендикулярно направлению воздушного потока с достаточным интервалом между ними (обычно это расстояние выбирается не меньшим, чем диаметр конденсатора). Это гарантирует, что все конденсаторы будут

охлаждаться до одинаковой температуры. На рис. 8 показано влияние эффекта охлаждения на максимально допустимое значение пульсирующего тока.

Теплопроводность. В большинстве приложений некоторое количество тепла распространяется за счет теплопроводности от выводов конденсаторов к печатной плате. Но охлаждение за счет теплопроводности может быть более эффективным, чем охлаждение за счет излучения или конвекции. Если установить алюминиевый конденсатор таким образом, что его корпус будет соприкасаться с (охлаждаемым) радиатором, то это может значительно снизить температуру конденсатора.

Следует отметить, что улучшенное охлаждение делает условия в устройстве отличающимися от нормальных условий, что снова приводит к необходимости использования поправочного коэффициента. В некоторых случаях проще измерить необходимые значения для R_{th} и ESR и вычислить предполагаемую рабочую температуру алюминиевого конденсатора. Использование этой температуры как T_{amb} в номограмме для $I_A/I_R=0$ позволяет определить подходящий множитель для срока службы.

Далее рассмотрим некоторые важные параметры, влияющие на срок службы изделий, использующих алюминиевые конденсаторы.

Максимум ESR

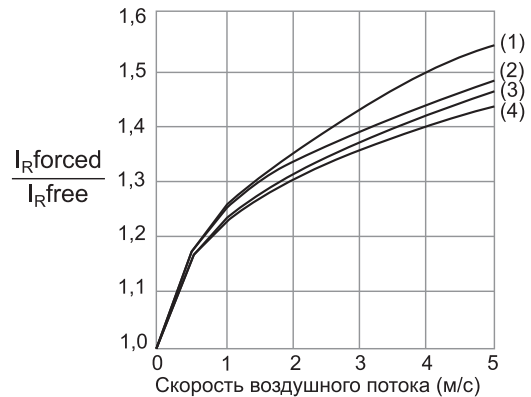
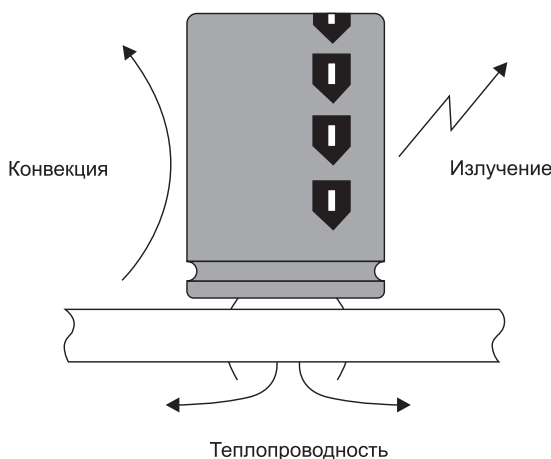
Уже упоминалось, что на высоких частотах и при низких температурах нельзя пренебрегать значением ESR. До сих пор оно связывалось только

с омическими потерями и нагревом, вызванным пульсирующим током. Однако ESR алюминиевого конденсатора может вызывать и другие эффекты, особенно для частот, превышающих 10 кГц, где эта величина начинает вносить основной вклад в общий импеданс алюминиевого конденсатора.

Рассмотрим простейшую эквивалентную схему конденсатора, изображенную на рис. 3 (см. «Вестник электроники» №3, 2011). Когда конденсатор заряжается/разряжается проходящим через него током, это приводит к увеличению/уменьшению падения напряжения на конденсаторе (поскольку $I=C \cdot dU/dt$) и падению напряжения на ESR (поскольку $U=I \cdot ESR$).

Если конденсатор заряжается высокочастотными импульсами тока с малым коэффициентом заполнения (типичная ситуация для обратногоходового источника питания), то пульсации, вызванные падением напряжения на ESR, могут оказаться выше, чем пульсации, вызванные зарядом/разрядом конденсатора (рис. 9).

Максимально допустимое значение пульсаций выходного напряжения определяет максимально допустимую величину ESR для алюминиевого конденсатора. Снова следует подчеркнуть, что ESR на высоких частотах имеет зависимость от температуры, и при нагреве конденсатора его ESR падает. Поэтому при росте температуры напряжение пульсаций на выходе источника питания будет снижаться. Наименьшее значение ESR на высоких частотах можно получить, используя се-



Кривая 1: размер корпуса $\varnothing D \times L=35 \times 25$ мм
 Кривая 2: размер корпуса $\varnothing D \times L=22 \times 25$ мм
 Кривая 3: размер корпуса $\varnothing D \times L=35 \times 50$ мм
 Кривая 4: размер корпуса $\varnothing D \times L=22 \times 40$ мм

● Рис. 8. Распространение тепла от алюминиевого конденсатора в окружающую среду и эффект от обдува воздухом

рии конденсаторов с низким значением ESR (за счет применения оптимальных материалов), с длинными корпусами малого диаметра (низкое сопротивление фольги) или в корпусах большого размера (больше фольги в контакте с бумагой/электролитом). Поскольку алюминиевые конденсаторы, в общем случае, имеют 2 контакта с фольгой, параллельное включение нескольких алюминиевых конденсаторов небольшой емкости может обеспечить меньшее значение ESR, чем один большой алюминиевый конденсатор. Конструкция, которая используется в конденсаторах с резьбовыми выводами, фактически представляет собой несколько параллельно включенных конденсаторов, размещенных в одном корпусе. При разработке источников питания возникает много ситуаций, когда использование алюминиевых конденсаторов требует особого рассмотрения. Например, если конденсаторы перед использованием длительно хранились, при использовании параллельного или последовательного включения конденсаторов, или если механическая конструкция алюминиевого конденсатора оказывает решающее влияние на конфигурацию источника питания.

Ток утечки и срок складского хранения

Ток утечки является характеристикой, которая отражает тот факт, что электролит алюминиевого конденсатора химически взаимодействует со слоем оксида алюминия и медленно его растворяет. Приложение напряжения к обкладкам конденсатора вызывает электрохимическую реакцию, которая восстанавливает этот слой. После восстановления слоя оксида электрический ток уменьшается до уровня, необходимого, чтобы сбалансировать химическую реакцию, которая растворяет оксид алюминия. Электрический

ток, поддерживающий электрохимическую реакцию, и есть ток утечки. Если алюминиевый конденсатор не используется в течение нескольких лет, то при первом включении за счет уменьшения толщины оксидного слоя может увеличиться ток утечки. Выделение тепла, вызванное большим током утечки, может разрушить конденсатор. Срок складского хранения указывает на промежуток времени, в течение которого алюминиевый конденсатор может храниться без значительного увеличения тока утечки. В нормальных условиях составляет 3, 4 и 10 лет для конденсаторов с предельной рабочей температурой 85, 105 и 125 °С соответственно [3]. Если после хранения ток утечки оказался слишком большим, то перед установкой конденсаторов в источники питания для восстановления оксидного слоя применяется тренировка (или формовка) конденсаторов путем подачи на них постоянного напряжения. Чтобы предотвратить перегрев во время формовки, необходимо ограничивать ток через конденсатор. Для определения максимального тока при формовке конденсатора можно воспользоваться следующей формулой:

$$I_{\max} = A_{\text{surf}} / U_f, \quad (10)$$

где I_{\max} — максимальный ток в мА, A_{surf} — площадь поверхности алюминиевого конденсатора в мм², а U_f — рабочее напряжение конденсатора в В. Напряжение на алюминиевом конденсаторе должно быть меньше его рабочего напряжения U_r .

Параллельное соединение алюминиевых конденсаторов

Основное преимущество параллельного соединения алюминиевых конденсаторов состоит в том, что пульсирующий ток делится между всеми конденсаторами. Например, через каждый из двух одинаковых алюминиевых кон-

денсаторов, включенных параллельно, протекает половина пульсирующего тока, и поэтому значение I_A/I_R также уменьшается в 2 раза. Поскольку рост температуры пропорционален квадратному корню из I_A/I_R (уравнение 6), то при параллельном соединении конденсаторов температура будет расти в 4 раза медленнее, чем в случае использования одного конденсатора. Если выбрать $I_A/I_R > 1$, то это может привести к значительному увеличению срока службы конденсаторов. При параллельном соединении алюминиевых конденсаторов для правильного распределения пульсирующего тока необходимо учитывать временную зависимость их температурных, частотных и электрических характеристик. Поскольку падение напряжения U_f одинаково для всех включенных параллельно конденсаторов, то пульсирующий ток I_f через каждый конденсатор определяется его импедансом Z_f (f — это частота пульсирующего тока). Используя упрощенную электрическую модель, изображенную на рис. 3, можно получить следующее выражение для пульсирующего тока:

$$I_f = U_f / Z_f, \quad \text{где } Z_f = ((1 / 2\pi f C_f)^2 + \text{ESR}_f^2)^{1/2}. \quad (11)$$

Для большинства источников питания на высоких частотах омические потери (ESR_f) будут вносить основной вклад в импеданс. Это означает, что алюминиевые конденсаторы с меньшим значением ESR_f будут выдерживать больший пульсирующий ток и потому работать при большей температуре. Такая высокая температура будет приводить к ускорению процесса старения, вызывающего быстрый рост ESR_f со временем. Это приведет к уменьшению доли пульсирующего тока, протекающего через конденсатор, и снижению его температуры. Доля пульсирующего тока, протекающего через другие конденсаторы, будет увеличиваться, что приведет к их разогреву и старению. Такое «балансирование» пульсирующего тока, в конечном счете, гарантирует, что общий срок службы параллельно включенных конденсаторов будет близок к вычисленному значению. Для низких частот, обычно равных удвоенной частоте питающей сети

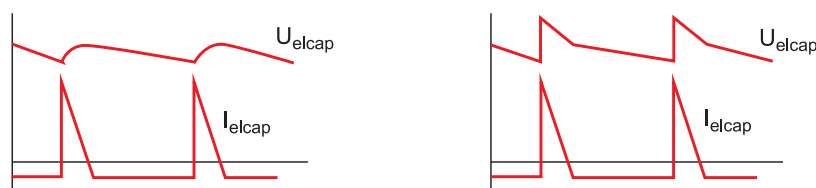


Рис. 9. Пульсации напряжения на алюминиевом конденсаторе без ESR и с ESR