

Странно в наше время слышать советское слово «дефицит», однако разработчики радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) с ним столкнулись. К нему привел резкий спрос на широко используемые в электронике многослойные керамические конденсаторах (MLCC). Он связан с тем, что современный смартфон содержит сотни, а электрический автомобиль более 10 тысяч MLCC, а такие объемы промышленность обеспечить не в состоянии.

Проблема дефицита многослойных керамических конденсаторов и её возможные решения

Владимир Рентюк, г. Запорожье

(Окончание. Начало см. Э 7-8/2019)

Итак, приступим к вычислениям, в отличие от классической формулы для вычисления реактивного сопротивления конденсатора, подразумевающей синусоидальную форму сигнала, использованный в знаменателе уравнения коэффициент «8», учитывает реальную форму напряжения пульсаций. Не забываем, что они треугольные:

$$X_{C_{IN,1}} = \frac{1}{8 \cdot f_{sw} \cdot C_{MLCC-TOTAL}} = \frac{1}{8 \cdot 400 \text{ кГц} \cdot 66 \text{ мкФ}} = 4,7 \text{ мОм} \quad (12)$$

$$Z_{C_{IN,1}} = \sqrt{X_{C_{IN,1}}^2 + ESR_{C_{IN,1}}^2} = \sqrt{(4,7 \text{ мОм})^2 + (1 \text{ мОм})^2} = 4,8 \text{ мОм} \quad (13)$$

$$X_{C_{IN,2}} = \frac{1}{8 \cdot f_{sw} \cdot C_{DAMP}} = \frac{1}{8 \cdot 400 \text{ кГц} \cdot 330 \text{ мкФ}} = 0,9 \text{ мОм} \quad (14)$$

$$Z_{C_{IN,2}} = \sqrt{X_{C_{IN,2}}^2 + ESR_{C_{IN,2}}^2} = \sqrt{(0,9 \text{ мОм})^2 + (200 \text{ мОм})^2} = 200 \text{ мОм} \quad (15)$$

Соответственно вычисленным импедансам, мы имеем распределение токов, как:

$$I_{rms,CIN1} = \frac{I_{C_{IN-RMS}}}{1 + \frac{Z_{C_{IN,1}}}{Z_{C_{IN,2}}}} = \frac{5,03 \text{ А}}{1 + \frac{4,8 \text{ мОм}}{200 \text{ мОм}}} = 4,92 \text{ А} \quad (16)$$

$$I_{rms,CIN2} = \frac{I_{C_{IN-RMS}}}{1 + \frac{Z_{C_{IN,2}}}{Z_{C_{IN,1}}}} = \frac{5,03 \text{ А}}{1 + \frac{200 \text{ мОм}}{4,8 \text{ мОм}}} = 112 \text{ мА} \quad (17)$$

Справедливости ради, стоит отметить, что один из токов можно вычислить как разность от общего тока пульсаций. Подавляющее большинство среднеквадратичного тока пульсаций берут на себя керамические MLCC конденсаторы, а именно это и есть желаемый эффект. Пульсации же тока в алюминиевом электролитическом конденсаторе составляет около 25% номинального максимума.

Если не требуется увеличенный срок службы для электролитического конденсатора, то суммарная емкость MLCC конденсаторов может быть уменьшена. Но это увеличит пульсации тока через электролитический конденсатор, а его нагрев и ускорит испарение его электролита. С другой сторо-

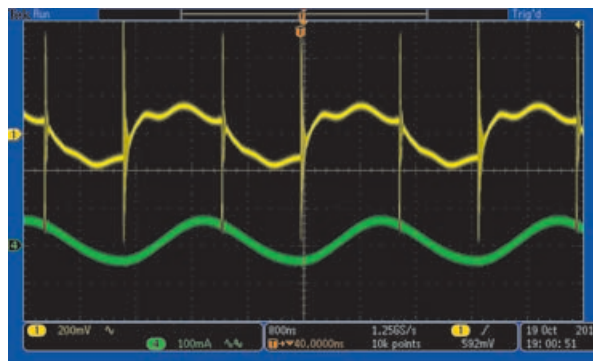


Рис.7

ны, если источник питания требует увеличенный срок службы и/или работает в условиях высокой температуры окружающей среды, то здесь может быть увеличена емкость MLCC конденсаторной сборки.

Подведем итог – алюминиевые электролитические конденсаторы с высоким значением ESR хороши для демпфирования, но в целом они не обеспечивают большого снижения пульсации входного напряжения. Что касается уровня пульсаций, то, по сравнению с использованием только MLCC конденсаторов, он будет ненамного ниже, что связано с высоким импедансом алюминиевого конденсатора на частоте 400 кГц.

На рис.7 показана форма напряжения пульсаций напряжения (верхняя трасса) и тока (нижняя трасса) по входу с добавкой алюминиевого электролитического конденсатора 330 мкФ, с ESR равным 200 мОм.

Сборка из полимерных алюминиевых электролитических и многослойных керамических конденсаторов

Третьим типом конденсаторов, который мы можем использовать по входу DC/DC-преобразователей – это полимерный алюминиевый электролитический конденсатор. Эти конденсаторы похожи на стандартные алюминиевые электролитические конденсаторы, но, в отличие от последних, в них используется не жидкий (гелеобразный), а твердый полимерный электролит. Они имеют значительно более низкое значение ESR, чем традиционные, что дает им основное преимущество, приближая к уровню танталовых, а в ряде случаев и керамических многослойных конденсаторов, при сохранении всех преимуществ

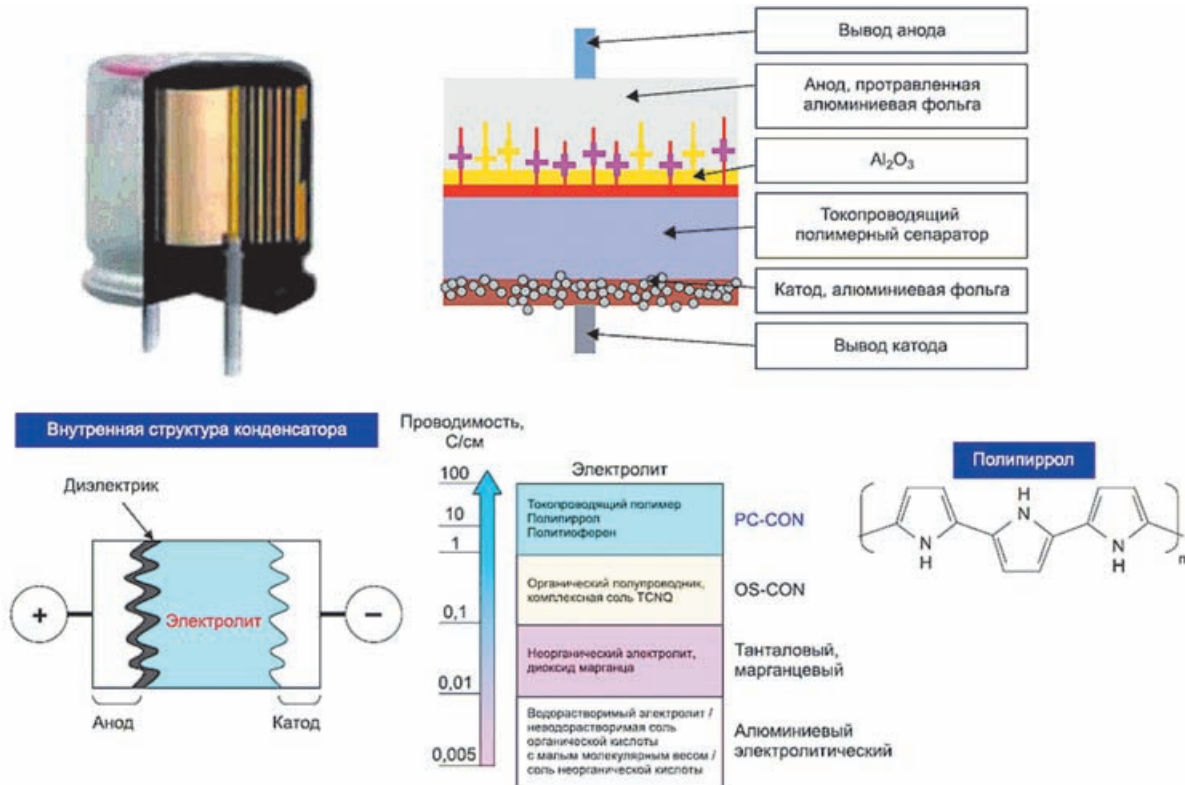


Рис.8

ществ традиционных алюминиевых. Конструкция такого конденсатора показана на рис.8.

Основным показателем, характеризующим электролитические конденсаторы, является электролитическая проводимость. Алюминиевый электролитический конденсатора с жидким электролитом имеет электролитическую проводимость до 0.04 См/см, а алюминиевый полимерный 4 См/см, что в 100 раз выше! Разница в используемом электролите снижает значение ESR и увеличивает надежность и рабочий ток конденсатора. При одинаковых габаритах, номинальном напряжении и собственной емкости, полимерные алюминиевые электролитические конденсаторы имеют гораздо более низкое, по сравнению со стандартными электролитами, ESR. Низкое значение ESR означает, что они могут работать с большими пульсирующими токами, а присущее им низкое значение ESL увеличивает частоту их собственного резонанса, что делает такие конденсаторы удачным, когда необходимо обеспечить низкий уровень пульсаций входного напряжения. Более подробно про отличия электролитических конденсаторов смотрите, например, [1].

Для понижающего DC/DC-преобразователя наиболее хорошо подходит серия полимерных алюминиевых электролитических конденсаторов WCAP-PSLC, предназначенных для поверхностного монтажа, что связано с их высокой частотой собственного резонанса. В отличие от стандартных электролитических конденсаторов, у полимерных электролитических конденсаторов на частоте 400 кГц их емкость обычно не уменьшается, так что один такой конденсатор может обеспечить большую емкость, чем сборка из двенадцати MLCC конденсаторов, которая использовалась в предыдущих примерах. Значение ESR для конденсаторов серии WCAP-PSLC, предлагаемых компанией Würth Elektronik, лежит в диапазоне от 8 до 15 мОм, что намного ниже по сравнению со стандартными электролитиче-

скими, хотя и выше, чем у MLCC конденсаторов. Это может иметь негативные последствия в том случае, когда один или два полимерных конденсатора используются для замены полной сборки из двенадцати конденсаторов типа MLCC. Так что для того, чтобы уровень пульсаций входного напряжения оставался на минимально определенном уровне, вклад ESR этих конденсаторов должен быть принят во внимание.

Ниже приведенные расчеты показывают, что вклад ESR и разряда емкости вносят вклад в 50% от общего уровня пульсаций. Тем не менее, для уточнения всех параметров, здесь полезны и компьютерное моделирование, и лабораторная проверка, не забываем, что в любом случае именно они являются критерием истины. Итак, для используемого нами в качестве примера DC/DC-преобразователя, минимально допустимая входная емкость и минимально возможная ESR входных конденсатора, соответственно, равны:

$$C_{in\ min} = \frac{I_{Source\ max} \cdot (1 - D_{MAX})}{f_{SW} \cdot v_{in\ max}} \cdot 2 = \frac{5,26\ A \cdot (1 - 0,53)}{400\ кГц \cdot 100\ мВ} \cdot 2 = 124\ мкФ \quad (18)$$

$$ESR_{MIN} = \frac{v_{in\ max}}{I_{IN-ПК} \cdot 2} = \frac{100\ мВ}{11,5\ A \cdot 2} = 4,3\ мОм \quad (19)$$

Для высококачественного оборудования в роли входных конденсаторов их DC/DC-преобразователей для входного напряжения 12 В, хорошим выбором являются полимерные алюминиевые электролитические конденсаторы WCAP-PSLC 875075355001 с номинальным рабочим напряжением 16 В. Эти SMD конденсаторы имеют емкость 180 мкФ и ESR всего в 10 мОм и рассчитаны на среднеквадратичный ток пульсаций в 4.7 А. Предлагаемый конденсатор имеет размеры 8.3x8.3 мм при высоте 11.7 мм. Два таких конденсатора будет иметь ESR около 5 мОм, что достаточно близко к целе-

вому значению и обеспечат более чем достаточную общую емкость.

Кроме того, два таких конденсатора будут занимать меньше места на печатной плате, чем двенадцать дефицитных MLCC конденсаторов типоразмера 1206 и, естественно, гораздо меньше, чем сборка из MLCC конденсаторов со стандартным алюминиевым конденсатором из примера, рассмотренного выше. И, наконец, их совокупный допустимый ток пульсаций составит более 8 А (среднеквадратичный), что гарантирует хороший технологический запас и, следовательно, хорошее и надежное решение без лишнего нагрева.

Однако для того чтобы снизить ESR и поддерживать низкий импеданс сборки входных конденсаторов за пределом, вызванным собственным резонансом полимерных алюминиевых электролитических конденсаторов, необходимо принять определенные меры. Они заключается в том, что необходимо предусмотреть установку, по крайней мере, двух MLCC конденсаторов, причем двух различных типоразмеров и номиналов – один 1210 емкостью 10 мкФ и один 0805 номиналом в 100 нФ. Эти два конденсатора не только выполняют указанную выше задачу, но и уменьшают уровень шумов. Эту миссию, в основном, возьмет на себя конденсатор емкости 100 нФ.

Результат применения полимерного электролитического алюминиевого конденсатора установленного по входу преобразователя, приведен на рис.9 (форма напряжения пульсаций напряжения (верхняя трасса) и тока (нижняя трасса) по входу для комбинации двух полимерных электролитических алюминиевых конденсаторов емкостью 180 мкФ и двух MLCC конденсаторов – одного номиналом в 10 мкФ и второго 100 нФ).

По отношению к варианту связки MLCC конденсаторы плюс алюминиевый электролитический (рис.7), мы видим, что полный размах амплитуды пульсации на частоте переключения, при использовании полимерных конденсаторов, был уменьшен наполовину, что составило, приблизительно, 200 мВ. Тем не менее, как мы говорим – «иголки», здесь выше (если их раскрыть, то вы увидите гармонически затухающий процесс). Причина этого причина кроется в более высоком значении ESL этого решения и недостаточном демпфировании из-за низкого значения ESR использованных конденсаторов (ранее минимально необходимое сопротивление демпфирования было определено, как 135 мОм), так что низкое ESR может привести при определенной комбинации с входной индуктивностью к возникновению паразитных колебаний. Однако имеется ряд иных решений для подавления «иголок» и «звона», например, шунтирование резистором катушки ин-

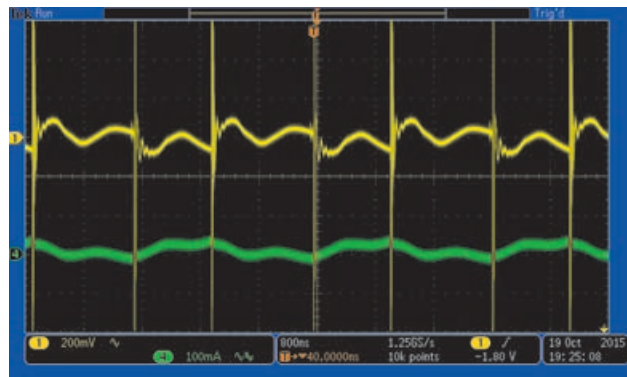


Рис.9

дуктивности или включение RC-цепочки, но их рассмотрение в задачу настоящей статьи не входит.

Полимерные электролитические алюминиевые конденсаторы берут на себя большую часть пульсации тока, а это большая разница по сравнению со стандартными алюминиевыми электролитическими конденсаторами. Это связано с тем, что импеданс таких конденсаторов на частоте переключения 400 кГц намного ниже, чем у обычных алюминиевых и заметно ниже, чем у MLCC конденсатора с номинальной емкостью в 10 мкФ. Полимерные конденсаторы рассчитаны на ток пульсаций 4 А, так что они могут легко обрабатывать в общей сложности 3.78 А разделенные между ними. Если же использовать один такой конденсатор, то больший ток пульсаций будет принимать на себя уже MLCC, так как фактическая емкость полимерного электролитического алюминиевого конденсатора составляет менее 180 мкФ.

Все сказанное справедливо и в отношении выходных конденсаторов. На рис.10 показано напряжение пульсации на выходе понижающего DC/DC-преобразователя при использовании алюминиевого полимерного конденсатора на выходе понижающего DC/DC-преобразователя совместно с керамическим многослойным конденсатором [1].

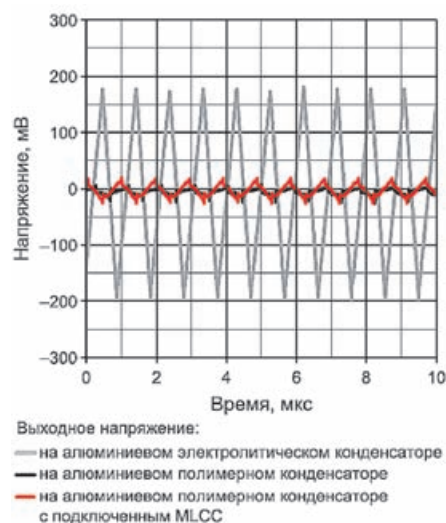


Рис.10

Из всего сказанного можно сделать вывод – вариант ухода от использования дефицитных MLCC конденсаторов большой емкости есть. Наиболее оптимальный вариант – это использование алюминиевых полимерных электролитических конденсаторов с добавкой одного-двух MLCC конденсаторов не дефицитных номиналов и принятия, при необходимости, мер по демпфированию входной индуктивности. Как вариант – можно перейти на готовые модули и переложить решения проблемы дефицита и ЭМС на чужую голову. Однако, хотя модули – это часто действительно хорошее, если не наилучшее решение, которое автор статьи поддерживает двумя руками [3], но в этом случае вам придется переплатить в несколько раз.

Литература:

1. Фрэнк Пухане (Frank Puhane), перевод Владимир Рентюк. Алюминиевые конденсаторы: электролитический или полимерный? Полноценная реализация их преимуществ // Электрик. – 2019. – №4. – С. 4.
2. Richardson Christopher. ANP038 «Selecting and Combining Capacitor Types for High Ripple Switching Converter Input and Output Rails», Würth Elektronik
3. Рентюк В. Изолированный DC/DC-преобразователь малой мощности: сделать или купить? // Электрик. – 2016. – №12.