

## Решения проблемы пульсаций и помех DC/DC преобразователей

### Вступление

Всем без исключения DC/DC преобразователям присущи пульсации выходного напряжения, которые возникают из-за заряда и разряда выходного конденсатора в соответствии с каждым импульсом энергии, поступающей от внутреннего генератора. Эти пульсации выходного напряжения имеют, в зависимости от топологии, частоту, равную целому или удвоенному значению от основной частоты преобразования и лежат в области 100-200 кГц. На эти пульсации накладываются короткие выбросы напряжения (пики) с заполнением в виде затухающих колебаний с гораздо более высокой частотой, лежащей уже, как правило, в диапазоне мегагерц.

Входной ток преобразователя также имеет две компоненты - постоянную составляющую, которая меняется в зависимости от нагрузки и переменную составляющую тока. Переменная составляющая называется пульсацией входного тока. В англоязычной литературе и в некоторых переводах используется два определения: Back Ripple Current - входной обратный ток помех или Input Reflected Ripple Current - входной отраженный ток помех. Эти пульсации вызваны пульсирующим током преобразователя, их частота соответствует частоте его внутреннего генератора. Дополнением к этой комбинации токов являются также меньшие по уровню короткие всплески, в виде пиков, которые возникают в моменты переключения. Поскольку эти пики весьма короткие, то их спектр лежит в области высоких частот. Сам по себе постоянный ток не вызывает особых проблем, но до тех пор, пока он соответствует нагрузочной мощности первичного источника питания, однако импульсы переменного тока (особенно короткие) могут создать помехи для функционирования других частей общей схемы из-за наличия паразитных индуктивной и емкостной связи в печатных проводниках, проводах и разъемах. Кроме того, входной ток вызывает падение напряжения на вводах из-за наличия некоторого собственного сопротивления в этой цепи. При наличии пульсирующего тока в первичной входной цепи, это падение напряжения так же будет пульсировать, и входные проводники и провода будут выступать в качестве излучающих антенн.

Пульсации по входу и выходу могут быть уменьшены с использованием внешних фильтров, но исходя из решения двух разных задач - выходной фильтр необходим, чтобы сгладить выходное напряжение, а входной фильтр необходим для уменьшения помех, вызванных током. Конструкция и выбор решения для этих фильтров не так тривиален, как это может показаться. Причина в том, что оба, как входной, так и выходной сигналы, содержат составляющие с широко разнесенным спектром частот и содержат, как асимметричные (дифференциальные), так и симметричные (синфазные) составляющие.

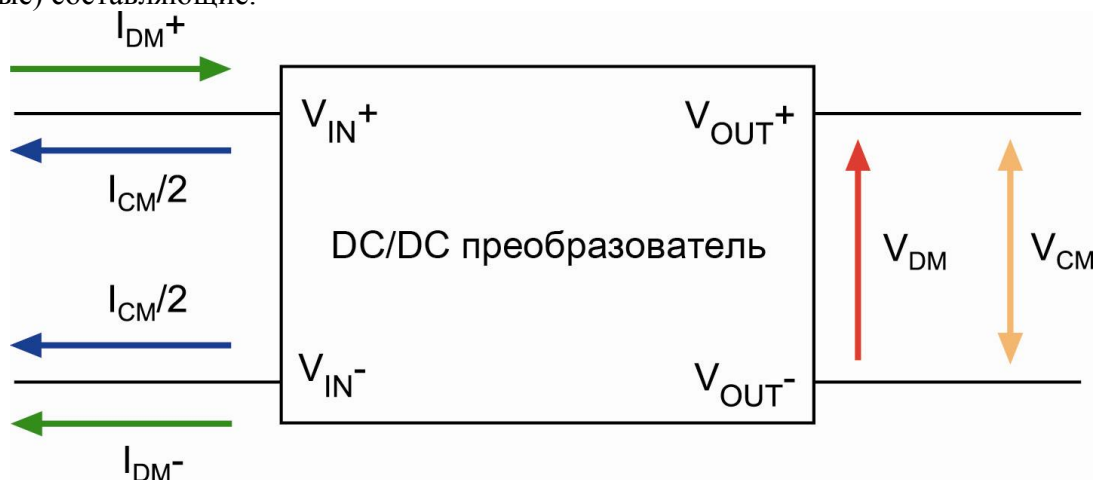


Рис. 1. Схематическое представление помех, генерируемых DC/DC преобразователями

#### Примечания:

CM – симметричные (синфазные) составляющие

DM – ассиметричные (дифференциальные) составляющие

Службе технической поддержки компании Resom иногда задают вопрос: «Почему бы вам просто не встроить необходимые входные и выходные фильтры в ваши преобразователи?» Ответ таков: «Во все наши преобразователи мы включаем лишь необходимую минимальную элементарную фильтрацию. Это позволяет нам выпускать изделия с приемлемым для большинства приложений уровнем входных и выходных пульсаций и помех в виде шумов. Мы могли бы усилить фильтрацию, но только увеличив при этом стоимость наших изделий. Для большинства клиентов компании, которые не нуждаются в такой более высокой степени подавления паразитных составляющих, чем та, которую уже и так обеспечивают наши стандартные изделия - это будет весьма существенным недостатком».

Кроме того, многие из наших преобразователей выполнены в сверхминиатюрных корпусах и в них просто физически не хватает места для установки большего числа катушек индуктивности и конденсаторов, чем те, что уже установлены. Потребители, которые не располагают лишним свободным пространством в их решениях, должны соотнести низкую стоимость и небольшой размер DC/DC модулей и принять как компромисс то, что пульсации и помехи могут быть несколько выше желаемого ими уровня. А клиенты, нуждающиеся в более высоком подавлении пульсаций и помех преобразователя, всегда могут самостоятельно добавить необходимые с их точки зрения элементы для дополнительной фильтрации и удовлетворять при этом свои потребности с тем увеличением стоимости общей спецификации на сборку изделия, который находится в пределах разумной необходимости.

## **Пульсации входного тока**

Пульсации входного тока указываются в спецификациях в миллиамперах от пика до пика (полная двойная амплитуда), и указываются, как правило, при номинальном входном напряжении и полной нагрузке. Но прежде, чем они могут быть отфильтрованы, эти пульсации должны сначала быть правильно измерены в конкретном приложении.

## **Измерение пульсаций входного тока**

Измерение входного тока при помощи цифрового мультиметра в режиме измерения тока даст результат в виде среднеквадратичного измерения, который будет игнорировать пульсации входного тока. Измерение входного тока осциллографа с токовыми клещами часто также дает не лучшие результаты. Это связано с высоким уровнем постоянной составляющей входного тока, который приводит к насыщению материала сердечника такого датчика тока, так что осциллограф может и не увидеть компоненты пульсации.

Решение заключается в использовании прецизионного токового шунта (измерительного резистора) и измерения на нем падения напряжения. Это позволит определить силу и форму тока. Однако здесь необходимо проявлять осторожность, так как некоторые низкоомные резисторы из-за особенностей их конструкции (они бывают проволочные) обладают повышенной индуктивностью, что оказывает влияние на результаты измерения. Для таких измерений должны быть использованы резисторы со сверхнизкой последовательной индуктивностью ( $<0,1$  мкГ). Такую низкую индуктивность могут обеспечить металлопленочные резисторы (без навивки). Тем не менее, сам метод измерения тоже имеет решающее значение, поскольку в ходе измерения легко могут быть допущены серьезные ошибки.

Во-первых, измерительный резистор должен иметь настолько низкое сопротивление, как это возможно. Это необходимо для того, чтобы он не оказывал заметного влияния на входное напряжение преобразователя. Если используется измерительный резистор с номинальным сопротивлением  $0,1$  Ом, то типичная настройка чувствительности осциллографа по вертикали (Y) на  $5$  мВ/деление обеспечит измерение тока в  $50$  мА. Во-вторых, само подключение измерительного щупа осциллографа должно быть как можно короче. Это необходимо для того, чтобы не захватить им излучаемые помехи. Рис.2 показывает правильный вариант подключения

щупа к измерительному резистору, а рис.3 показывает разницу в показаниях при правильном и неправильном способе подключения при проведении измерения.



Рис. 2. Правильное подключение при измерении пульсаций тока

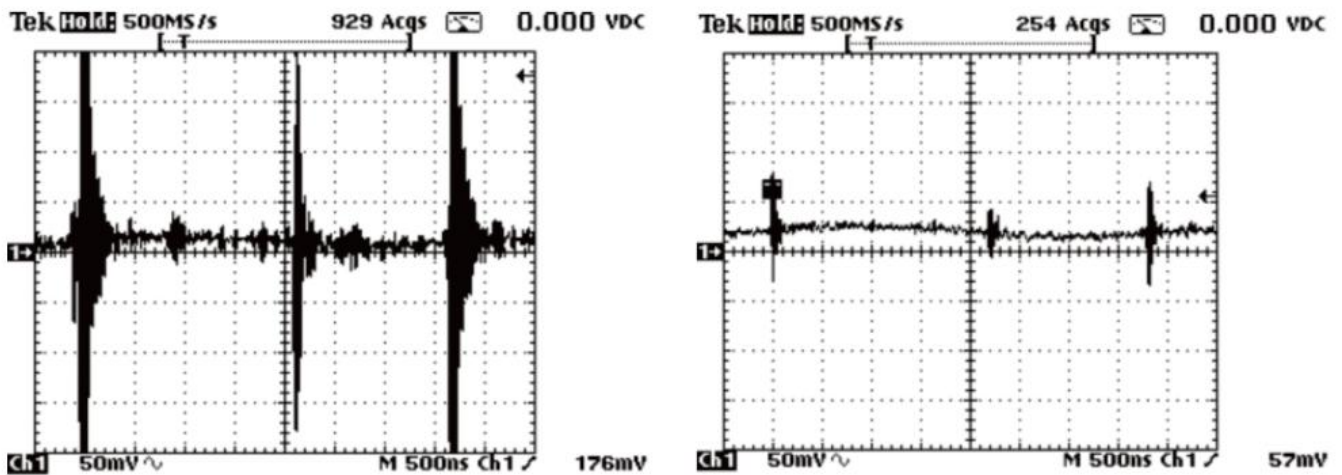


Рис. 3. Некорректный (слева) и правильный (справа) результат измерения одних и тех же пульсаций входного тока

### Контрмеры для подавления пульсаций входного тока

Самым простым способом уменьшить пульсации входного тока является подключение электролитического или танталового конденсатора с низким последовательным сопротивлением (ESR) непосредственно к входным контактам DC/DC преобразователя. Конденсатор дает энергию для пульсирующего импульсного тока с гораздо более низким импедансом, чем первичный источник питания через свой импеданс и импеданс входной цепи. Таким образом, первичный источник питания обеспечивает постоянную составляющую входного тока, а добавочный конденсатор – большую часть компонента переменного входного тока, и составляющая переменного тока в токе от первичного источника существенно уменьшается. Рис.4 иллюстрирует эту концепцию.

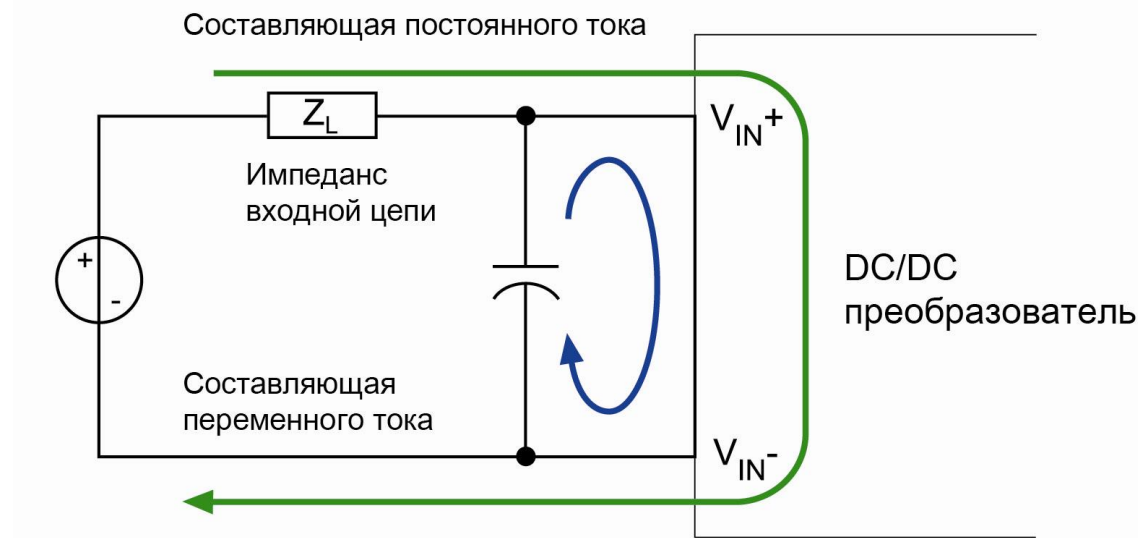


Рисунок 4. Уменьшение пульсаций входного тока при помощи входного конденсатора

Приведенные ниже осциллограммы наглядно показывают влияние добавленного входного конденсатора на пульсации входного тока DC/DC преобразователя. Для того чтобы получить более наглядный результат на экране осциллографа, осциллограммы были сделаны с использованием измерительного резистора номиналом в 1 Ом.

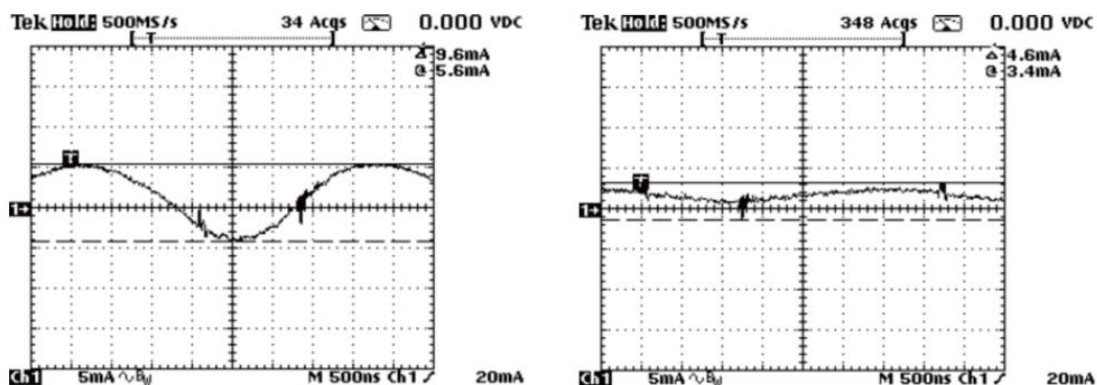


Рисунок 5. Демонстрация эффекта от установки дополнительного входного конденсатора номиналом в 47 мкФ по входу DC/DC преобразователя

Как видим, ток пульсаций при установке конденсатора емкостью 47 мкФ и с ESR 400 мОм на частоте 100 кГц, был уменьшен более чем вдвое. Если использовать более дорогой конденсатор, имеющий ESR, равное 35 мОм, пульсации уже становится трудно измерить, а на экране осциллографа остаются только пики помех переключения.

### Практический совет

Альтернативой использования весьма дорогих конденсаторов со сверхнизким значением ESR (в каталогах обозначаются, как Low ESR) является использование двух обычных конденсаторов, включенных параллельно. Например, один дорогой высококачественный конденсатор емкостью 47 мкФ может быть заменен двумя обычными емкостью по 22 мкФ с ESR, равным 230 мОм, чтобы дать эквивалентный конденсатор на 44 мкФ с ESR в 115 мОм (рис.6).

Составляющая  
постоянного тока

Составляющая  
переменного тока

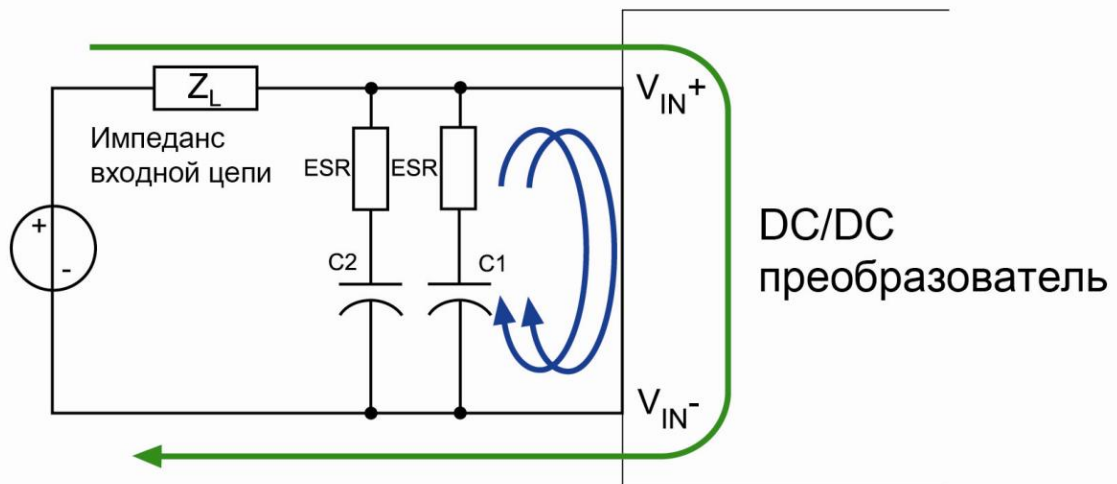


Рис. 6. Уменьшение пульсаций входного тока при помощи двух параллельных входных конденсаторов

Как можно видеть из осциллограммы, приведенной на рис.7, эффект уменьшения пульсаций входного тока от использования двух недорогих конденсаторов существенно не отличается от того, который получен с использованием дорогого конденсатора со сверхнизким ESR.

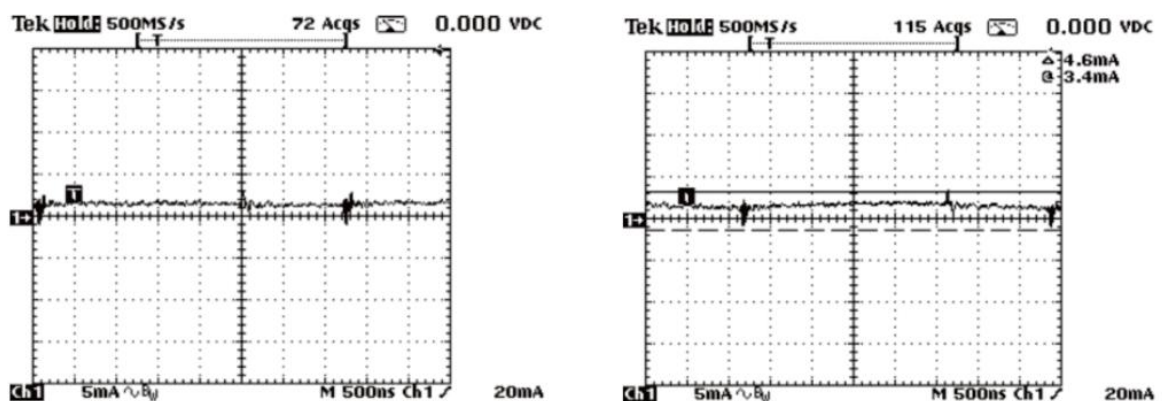


Рис. 7. Сравнение пульсаций входного тока при использовании конденсатора емкостью 47 мкФ со сверхнизким ESR и двух обычных конденсаторов емкостью в 22 мкФ, включенных параллельно

Видимые на осциллограммах остаточные всплески с током высокой частоты (пики) являются производными помех, возникающих при переключении преобразователя. Эти помехи возникают одновременно на обоих  $V_{IN}^{+}$  и  $V_{IN}^{-}$  входных клеммах преобразователя, поэтому они не могут быть отфильтрованы с помощью входного конденсатора. Этот тип помех является синфазным (англ. CM - Common Mode) и может быть устранен только путем ввода специального синфазного дросселя (см. ниже). При низких значениях входного напряжения для подавления пульсаций по входу, вместо электролитических конденсаторов могут быть использованы многослойные керамические конденсаторы (в каталогах обозначаются, как MLCC - Multi Layer Ceramic Capacitor).

Качественные конденсаторы этого типа имеют значение ESR около 3 мОм на частоте 100 кГц, что делает их весьма привлекательными для использования в качестве элементов подавления пульсаций входного тока. Однако необходимо убедиться, что входное напряжение преобразователя не будет превышать максимальное рабочее напряжение выбранного конденсатора. В противном случае возможен их пробой и отказ изделия, так что такие

конденсаторы должны быть использованы только при наличии первичных стабилизаторов или с наличием защиты от перенапряжения по входу.

### Выбор входного конденсатора

В предыдущем примере для уменьшений пульсаций входного тока был использован конденсатор емкостью 47 мкФ. Но почему именно этого номинала? Очевидно, что чем больше емкость конденсатора, тем больше энергии он может дать для питания преобразователя. К тому же конденсаторы большей емкости имеют и более низкие значения ESR. Это связано с большей внутренней поверхностью их электродных слоев. Но электролитические конденсаторы большой емкости занимают больше места на плате и существенно дороже. Поэтому процесс отбора конденсатора основывается на сметной стоимости, но с учетом того, как этот выбор отразится на характеристиках конечного изделия. Типичные значения входных конденсаторов могут варьироваться от 22 мкФ и до 220 мкФ, поэтому именно емкость в 47 мкФ является общим практическим компромиссом.

Более важным, чем значение емкости, является допустимый для данного конденсатора ток пульсаций. Протекающий через конденсатор переменный ток генерирует тепло. Если температура конденсатора превышает его указанные рабочие пределы, то срок службы конденсатора будет резко снижен. В крайнем случае, электролит внутри конденсатора закипает, и конденсатор быстро выходит из строя.

### Практический совет

Пульсации тока в конденсаторе довольно трудно измерить, так как добавление измерительного сопротивления последовательно с конденсатором сильно влияет на конечный результат. Если измерить пульсации входного тока без использования добавочных конденсаторов, а затем снова измерить, но уже с установленными конденсаторами, то разница как раз и покажет уровень пульсации тока, протекающего в конденсаторах. В качестве альтернативы, если известны ESR конденсатора и рабочая частота преобразователя  $f$ , то могут быть измерены остаточные пульсации входного напряжения  $V_{RIPPLE}$  из-за наличия импеданса  $Z_L$ , а пульсации тока вычислены по формуле:

$$I_{RIPPLE} = \frac{V_{RIPPLE}}{\sqrt{ESR^2 + \left(\frac{1}{2\pi f C}\right)^2}}$$

В справочной технической документации на конденсаторы (обычно она представлена в виде спецификации типа Data Sheet) указываются рекомендуемые максимальные значения для пульсирующего тока. Ограничивающим фактором является повышение температуры, которое вызвано рассеиваемой внутри конденсатора мощностью. Мощность, рассеиваемая в конденсаторе из-за пульсаций тока, вычисляется как:

$$P_{C,DISS} = I_{RIPPLE}^2 ESR$$

а полученное в результате повышение температуры будет равно:

$$T_{RISE} = P_{C,DISS} kA$$

Здесь:

$kA$  – это теплопроводность конденсатора, которая есть не что иное, как тепловое сопротивление  $k$  по отношению к площади поверхности конденсатора  $A$  в размах. Теплопроводность измеряется в  $^{\circ}C/Вт$ .



### Практический совет

Измерение тока пульсаций – это нелегкая задача, поэтому иногда проще измерить температуру конденсатора и получить значение тока пульсаций, исходя из повышения его температуры.

### Входной ток DC/DC преобразователей для случая их параллельного включения

На практике есть целый ряд приложений, которые требуют использования нескольких DC/DC преобразователей, подключенных параллельно к одному общему первичному источнику. Наиболее распространенными являются локализованные системы питания типа Point-of-Load (англ. POL - разновидность DC/DC преобразователей для архитектур с распределенным питанием, подключаемых в непосредственной близости с нагрузкой) и системы питания с резервированием (системы питания типа N+1). Каждый DC/DC преобразователь в таких системах будет генерировать свои собственные токи пульсаций, которые будут наложены на общий ток нагрузки первичного источника питания.

Рассмотрим два одинаковых DC/DC преобразователя с номинальной рабочей частотой 100 кГц. Из-за производственных допусков, один из таких преобразователей может иметь частоту переключения 100 кГц, а другой - 120 кГц. Гармонический анализ покажет нам три частотные линии в спектре - 100 кГц, 120 кГц и разность этих частот 20 кГц. Эту низкочастотную перекрёстную помеху (интерференцию), то есть частоту биений, чрезвычайно трудно отфильтровать.

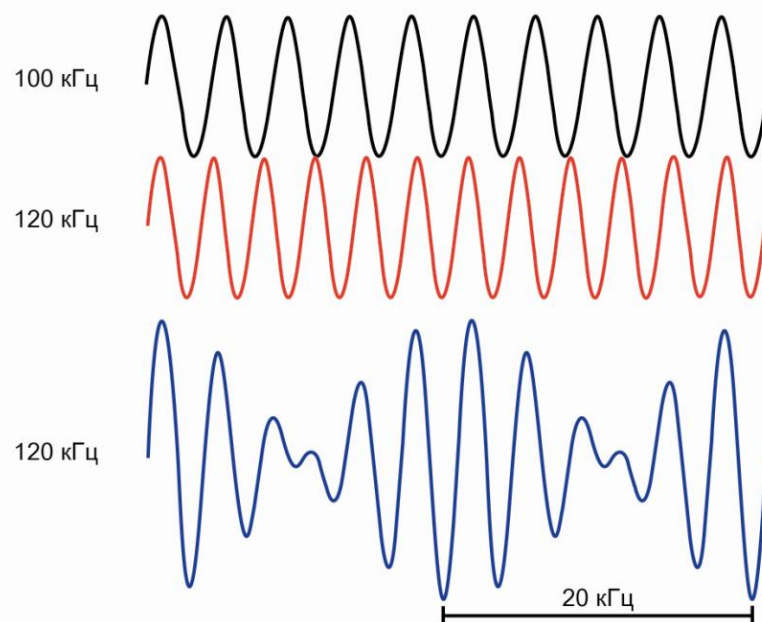


Рис. 8. Помеха в виде частоты биений (интерференции)

Помеху с частотой биений можно устранить путем использования индивидуальной фильтрации для входов каждого из DC/DC преобразователя (рис.9). Помеха с частотой биений, вызванная разностью частот преобразователей, блокируется отдельными LC-фильтрами. При этом дроссели должны быть работоспособны в условиях протекания через них больших постоянных токов. Типичные значения для индуктивности дросселей  $L$  являются довольно низкими. Дроссели с индуктивностью в пределах от 22 мкГ до 220 мкГ являются типичными для таких решений. Кроме того, первичный источник питания должен иметь собственный выходной конденсатор. Эффект, который дает использование LC-фильтров нижних частот, является двунаправленным, так что в результате  $\pi$ -фильтр, образованный элементами  $C_{MAIN}$ - $L$ - $C$  оказывается весьма полезен для дальнейшего общего снижения уровня помех.

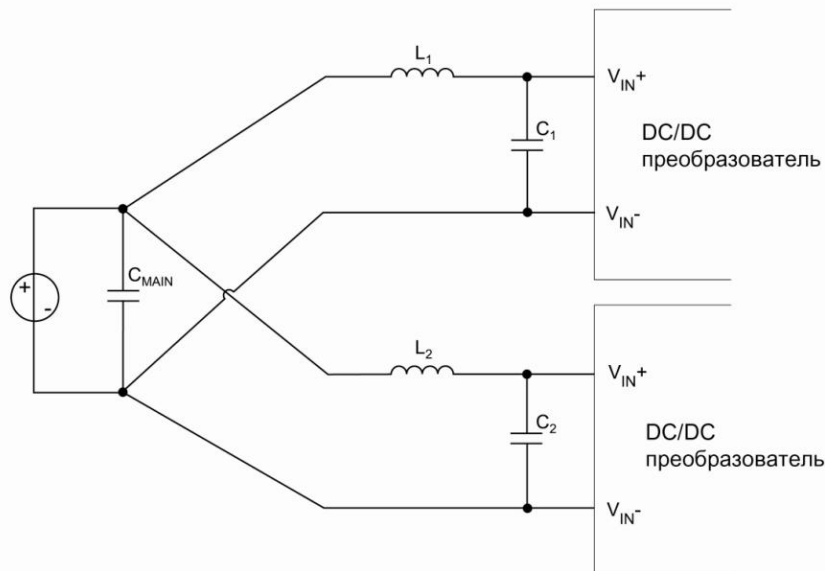


Рис. 9. Фильтрация помехи в виде частоты биений (интерференции)

### Практический совет

Важно, чтобы входные конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  были расположены как можно ближе к входным контактам вторичных преобразователей. Даже очень короткие дорожки печатной платы между конденсаторами и этими преобразователями будут снижать эффективность фильтров. Общее соединение  $V_{IN-}$  должно быть выполнено максимально широким проводником, а импеданс этого соединения был как можно ниже. Чтобы избежать дальнейших последствий от перекрестной интерференции, все соединения должны собраться в районе выходных клемм первичных преобразователей, то есть использовать подключение типа «звезда».

### Выходная фильтрация

Все DC/DC преобразователи имеют присущий им некоторый уровень пульсаций выходного напряжения и помехи (рис.10).

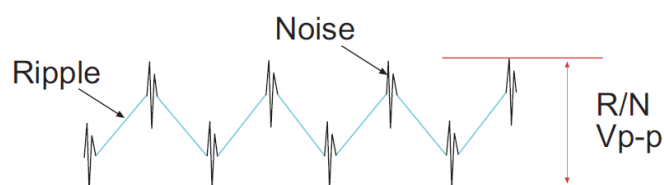


Рис. 10. Пульсации и помехи на выходе DC/DC преобразователя

Фильтрация выходных пульсаций и помех требует использования двух различных подходов. Это вызвано тем, что сами пульсации по своей природе являются асимметричными (дифференциальными), тогда как помехи в виде пиков являются симметричными (синфазными) помехами.

### Дифференциальный способ фильтрации выходного напряжения

Самый простой способ подавить пульсации выходного напряжения - добавить дополнительный конденсатор непосредственно на выход преобразователя (рис.11). Этот дополнительный конденсатор  $C_{EXT}$  будет работать в параллель с внутренним конденсатором преобразователя  $C_{OUT}$ .



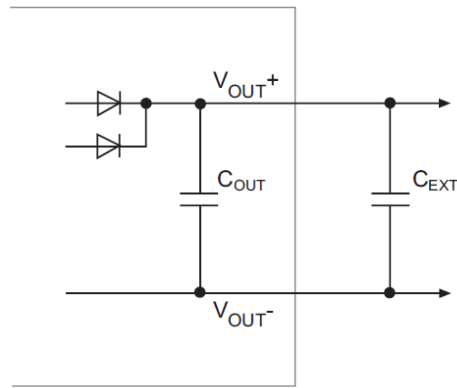


Рисунок 11. Фильтрация пульсаций выходного напряжения путем использования дополнительного внешнего конденсатора

Эффективность этого метода снижения пульсаций выходного напряжения  $V_{RIPPLE,p-p}$  (в мВ) зависит от общей емкости внутреннего  $C_{OUT}$  и дополнительного внешнего конденсатора  $C_{EXT}$ , выходного тока  $I_{OUT}$  и рабочей частоты преобразователя  $f_{OPER}$  в соответствии с уравнением:

$$V_{RIPPLE,p-p} = \frac{I_{OUT} 1000}{2 f_{OPER} (C_{OUT} + C_{EXT})}$$

Как видно из этого уравнения, добавление внешней емкости позволяет уменьшить пульсации напряжения. Например, если на выходе двухполупериодного выпрямителя преобразователя имеется встроенная емкость в 22 мкФ, ток нагрузки составляет 1 А, а рабочая частота преобразователя равна 100 кГц, то без внешнего конденсатора размах выходных пульсаций будет равен 226 мВ. Добавка внешнего конденсатора емкостью 22 мкФ уменьшит амплитуду пульсаций вдвое до уровня 112 мВ. Если требуемый уровень пульсаций выходного напряжения необходимо уменьшить еще вдвое, то есть до 56 мВ, то необходимо иметь общую емкость конденсаторов уже в 90 мкФ, другими словами, необходимо добавить внешний конденсатор на 68 мкФ.

Для еще большего уменьшения пульсаций, например, до 20 мВ, потребует уже конденсатор емкостью 2500 мкФ. Однако такая высокая выходная емкость может привести к проблеме запуска DC/DC преобразователя, а также отрицательно скажется на его реакции, особенно в виде скорости нарастания для быстрых изменений в выходной нагрузке и на времени задержки восстановления при выходе преобразователя из короткого замыкания.

Более практичным решением для уменьшения пульсаций выходного напряжения является добавка выходной индуктивности, то есть использование для этой цели внешнего фильтра низких частот на базе конденсатора и индуктивности (рис.12).

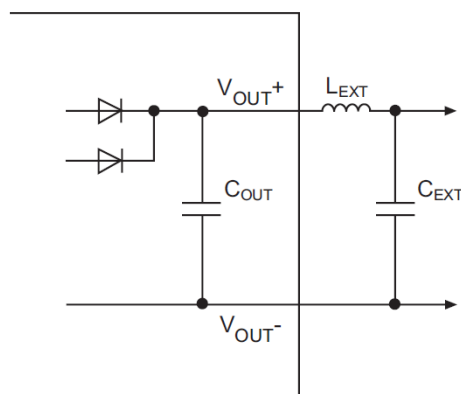


Рис. 12. Фильтрация пульсаций выходного напряжения путем использования внешнего LC-фильтра

При добавлении выходной индуктивности  $L_{EXT}$ , расчет уровня выходных пульсации выполняется по формуле:

$$V_{RIPPLE,p-p} = \frac{I_{OUT} 1000}{2 f_{OPER} (C_{OUT} + \sqrt{L_{EXT} C_{EXT}})}$$

Для сравнения используем условия предыдущего примера, если индуктивность дросселя  $L_{EXT}$  равна, допустим, 100 мкГ, то в этом случае выходное напряжение пульсаций в 20 мВ может быть достигнуто с выходным конденсатором  $C_{EXT}$  емкостью всего лишь в 645 мкФ. Это намного меньше, чем 2500 мкФ без дросселя. Однако необходимо убедиться, что выбранный дроссель рассчитан на максимальный рабочий выходной ток потребляемой нагрузкой от преобразователя и его сердечник не будет входить в насыщение от действия постоянного тока.

Если внутренняя схема и номиналы компонентов DC/DC преобразователя неизвестны, то используется "правило номер один" - частота среза LC-фильтра принимается равной 1/10 от значения рабочей частоты преобразователя  $f_{OPER}$ . Описанный выше подход дает эффективное снижение пульсаций выходного напряжения без лишних затрат на компоненты фильтра:

$$f_c = f_{OPER}/10 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

Частота среза фильтра  $f_c$  - это, как известно, точка на его амплитудно-частотной характеристике, в которой сигнал уменьшается на -3 дБ или, другими словами, он ослаблен на 30%. Поскольку LC-фильтр нижних частот относится к фильтрам второго порядка, которые имеют затухание -40 дБ/декада, сигнал с частотой, которая в 10 раз выше, чем частота среза фильтра, будет уменьшен в 100 раз.

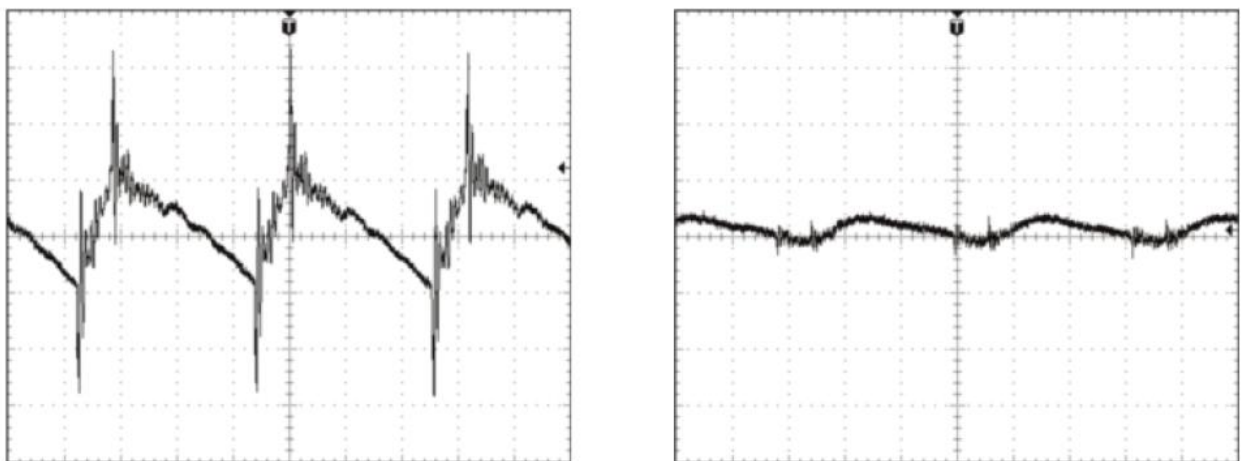


Рис. 13. Сравнение пульсаций входного напряжения до и после использования фильтра

### Фильтрация симметричных (синфазных) помех

Как уже упоминалось ранее, сигнал выходной помехи состоит из двух составляющих несимметричной (дифференциальной) и синфазной (симметричной) составляющих. Повторимся - пульсация по своей природе - это, в основном, дифференциальная помеха, а шумы и пики по своей природе, в основном, синфазные (симметричные) помехи. Поскольку симметричный сигнал в виде помех присутствует на всех выходах одновременно, она не может быть "увиден" выходной емкостью и добавления выходного LC-фильтра не уменьшает помехи такого рода. Синфазные помехи не были бы такой серьезной проблемой, если бы нагрузка была совершенно симметричной, линейной и изолированной.

Тем не менее, наличие малейшей нелинейности в поведении нагрузки или в токе, который течет обратно в землю, приведет к "выпрямлению" синфазной помехи и созданию на ее базе уже дифференциальной. Так что проблему синфазных помех также необходимо как-то решать. Есть два способа уменьшения синфазных помех. Это "короткое замыкание" синфазных шумов и помех с помощью низкоимпедансной линии передачи или путем использования специальных симметричных или синфазных дросселей (в англ. технической литературе и каталогах - Common Mode Choke).

Основной компонент синфазных помех - это пики. Они рождаются при переключении ключа на входной стороне преобразователя (это так называемые коммутационные помехи), которые потом попадают на выход преобразователя через емкостную связь в трансформаторе (рис.14). Чтобы уменьшить эти помехи, им необходимо обеспечить «легкий» путь назад к входной стороне. Если выход преобразователя гальванически изолирован, то такой обратный путь может быть обеспечен с помощью внешних конденсаторов, выбранных из расчета, чтобы предложить низкоимпедансный путь для тех частот, на которых проявляется эта помеха, а вернее с учетом ее основного спектра.

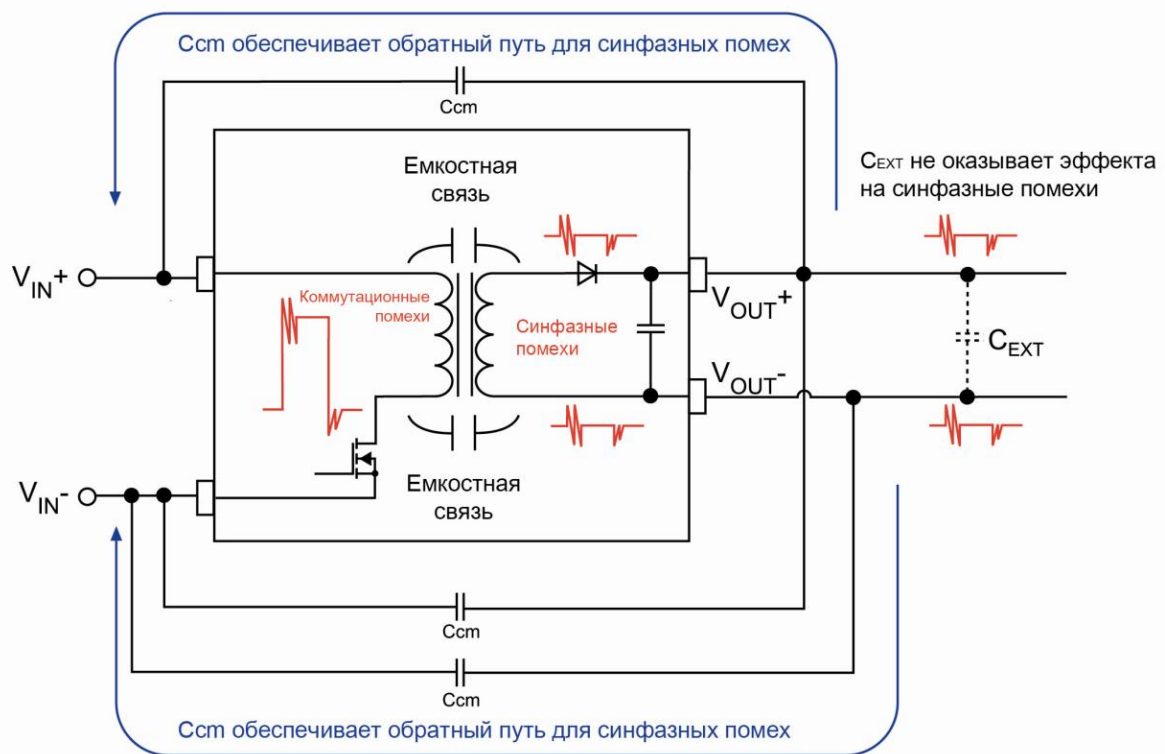


Рис. 14. Конденсаторы для подавления синфазных шумов и помех в изолированном DC/DC преобразователе.

Конденсаторы для борьбы с синфазными помехами, как правило, выбираются номинальной емкостью в диапазоне от 1 - 2 нФ. Это позволяет обеспечить низкий импеданс на частотах в несколько мегагерц, что и обеспечивает подавление коротких пиков коммутационных помех. Такие конденсаторы должны в обязательном порядке быть рассчитаны на высокое пробивное напряжение и пройти специальное высоковольтное тестирование (в англ. терминологии - Hipot Test Voltage), так как они размещены поперек изоляционного барьера.