

Стив РОБЕРТС (Steve ROBERTS)
Перевод: Владимир РЕНТЮК

Решения проблемы пульсаций и помех DC/DC-преобразователей: входная и выходная фильтрация

Введение

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. В зависимости от топологии эти пульсации выходного напряжения имеют частоту, равную целому или удвоенному значению от основной частоты преобразования, и, как правило, лежат в области 100–200 кГц. На такие пульсации накладываются короткие выбросы напряжения (пики) с заполнением в виде затухающих колебаний с гораздо более высокой частотой, находящейся уже обычно 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 меньшие по уровню короткие всплески в виде пиков, которые возникают в моменты переключения. Поскольку данные пики весьма короткие, их спектр лежит в области высоких частот. Сам по себе постоянный ток не вызывает особых проблем, 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 цепи. При наличии пульсирующего тока в первичной входной цепи это падение напряжения также будет пульсировать, и входные проводники и провода будут выступать в роли излучающих антенн.

Пульсации по входу и выходу могут быть уменьшены с помощью внешних фильтров, но исходя из решения двух разных задач: вы-

ходной фильтр необходим, чтобы сгладить выходное напряжение, а входной фильтр нужен для уменьшения помех, вызванных током. Конструкция и выбор решения для этих фильтров не столь тривиальны, как может показаться. Причина в том, что входной и выходной сигналы содержат составляющие с широко разнесенным спектром частот, а также асимметричные (дифференциальные) и симметричные (синфазные) составляющие (рис. 1).

Службе технической поддержки компании Resom иногда задают вопрос, почему бы просто не встроить необходимые входные и выходные фильтры в свои преобразователи. Ответ таков: во все наши преобразователи мы включаем лишь необходимую минимальную элементарную фильтрацию. Это позволяет 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 более высокой степени подавления паразитных составляющих, чем та, которую обеспечивают наши стандартные изделия, — это станет весьма существенным недостатком. Кроме того, многие наши преобразователи 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 своих 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 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 удовлетворить свои потребности, несмотря на увеличение стоимости общей спецификации на сборку изделия, которая, впрочем, остается в разумных пределах.

Пульсации входного тока

Пульсации входного тока указываются в спецификациях в миллиамперах от пика до пика (полная двойная амплитуда), при номинальном входном напряжении и полной нагрузке. Но прежде чем они могут быть отфильтрованы, 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 осциллографом с токовыми клещами часто также дает не лучшие результаты. Это связано с высоким уровнем постоянной составляющей входного тока, что приводит к насыщению материала сердечника датчика тока, а потому осциллограф может и не «увидеть» компоненты пульсации.

Решение заключается в использовании прецизионного токового шунта (измерительного резистора) и измерении на нем падения напряжения. Это позволит определить силу и форму тока. Однако здесь необ-

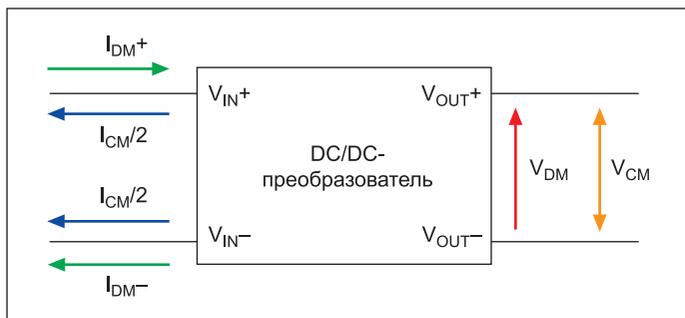


Рис. 1. Схематическое представление помех, генерируемых DC/DC-преобразователями (CM — симметричные (синфазные) составляющие; DM — асимметричные (дифференциальные) составляющие)

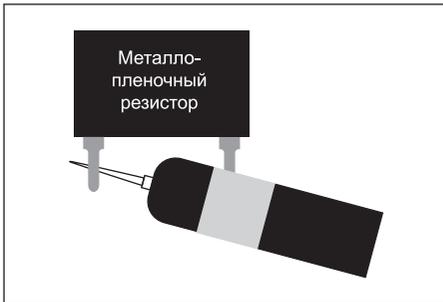


Рис. 2. Правильное подключение при измерении пульсаций тока

ходимо проявлять осторожность, поскольку некоторые низкоомные резисторы из-за особенностей своей конструкции (они бывают проволочные) обладают повышенной индуктивностью, что оказывает влияние на результаты измерения. Для таких измерений должны использоваться резисторы со сверхнизкой последовательной индуктивностью ($<0,1$ мкГн), которую могут обеспечить металлопленочные резисторы (без навивки). Тем не менее сама методика тоже имеет решающее значение, поскольку в ходе измерения легко допустить серьезные ошибки.

Во-первых, измерительный резистор должен иметь настолько возможно низкое сопротивление. 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/дел. обеспечит измерение тока в 50 мА. Во-вторых, само подключение измерительного щупа осциллографа должно быть как можно короче. Это требуется для того, чтобы не захватить им излучаемые помехи. На рис. 2 представлен правильный вариант подключения щупа к измерительному резистору, а рис. 3 демонстрирует разницу в показаниях при правильном и неправильном способе подключения при проведении измерения.

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

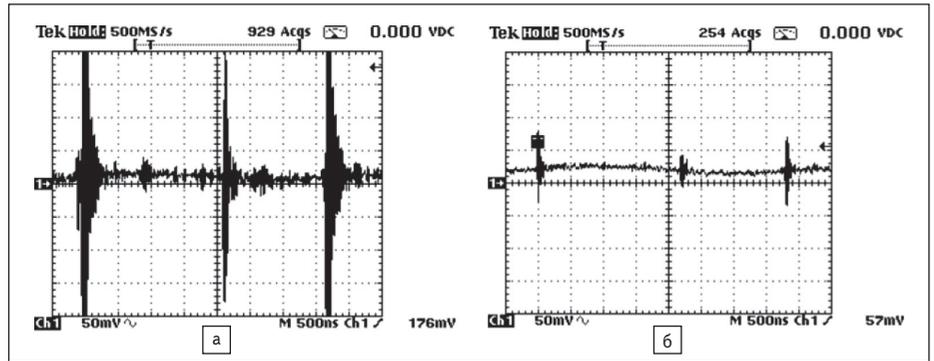


Рис. 3. Результаты измерения одних и тех же пульсаций входного тока: а) некорректный; б) правильный

существенно уменьшается. Эту концепцию иллюстрирует рис. 4.

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 помощью измерительного резистора номиналом в 1 Ом (рис. 5).

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, то пульсации уже трудно измерить, а на экране осциллографа остаются лишь пики помех переключения.

Практический совет

Альтернативой весьма дорогим конденсаторам со сверхнизким значением ESR (в каталогах обозначаются как Low ESR) становится 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).

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

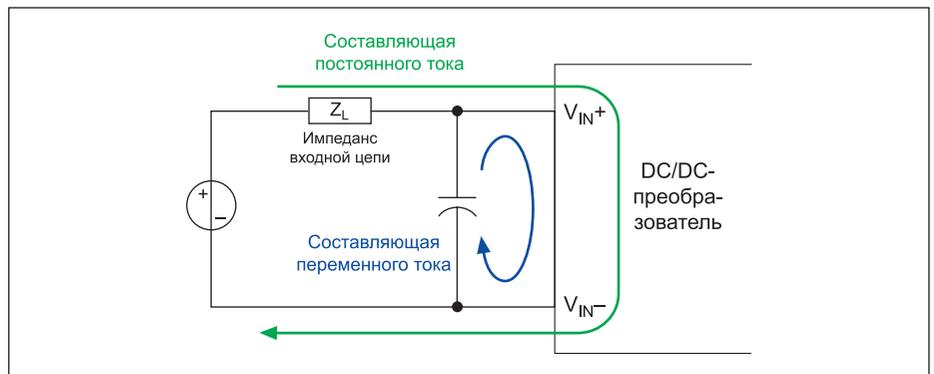


Рис. 4. Уменьшение пульсаций входного тока при помощи входного конденсатора

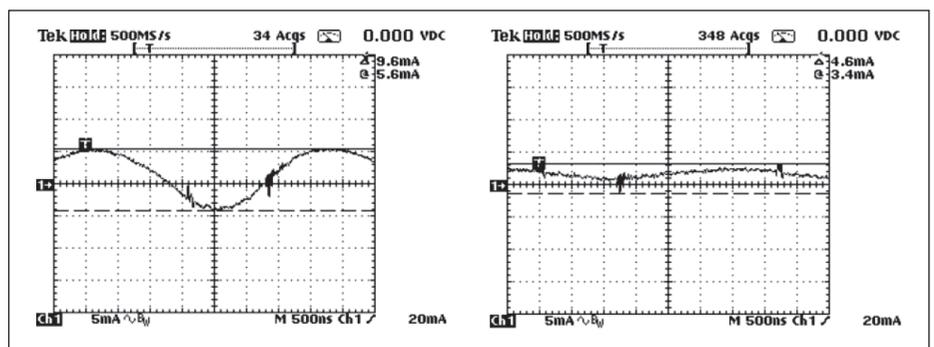


Рис. 5. Демонстрация эффекта от установки дополнительного входного конденсатора номиналом в 47 мкФ по входу DC/DC-преобразователя

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

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, вот почему такие конденсаторы должны быть использованы только с первичными стабилизаторами или с защитой от перенапряжения по входу.

Выбор входного конденсатора

Как было показано в предыдущем примере, для уменьшения пульсаций входного тока использовался 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 выбор прибора отразится на характеристиках конечного изделия. Типичные значения входных конденсаторов могут варьироваться от 22 до 220 мкФ, поэтому именно емкость в 47 мкФ является общим практическим компромиссом.

Однако для конденсатора еще большее значение, чем емкость, имеет допустимый 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.

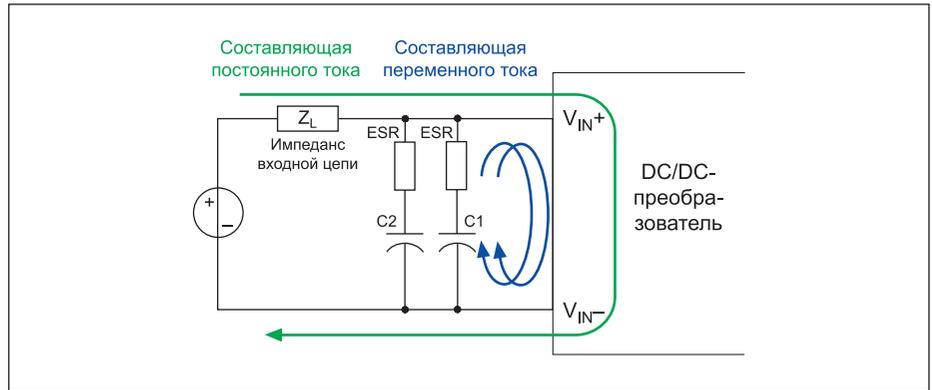


Рис. 6. Уменьшение пульсаций входного тока при помощи двух параллельных входных конденсаторов

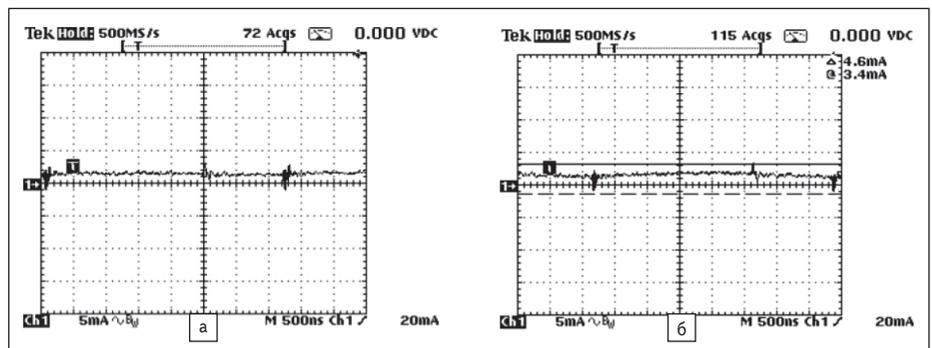


Рис. 7. Сравнение пульсаций входного тока при использовании: а) конденсатора емкостью 47 мкФ со сверхнизким ESR; б) двух обычных конденсаторов емкостью 22 мкФ, включенных параллельно

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 помощи добавочных конденсаторов, а затем снова измерить, но уже с установленными конденсаторами, то именно разница и покажет уровень пульсации тока, протекающего в конденсаторах. Если известны ESR конденсатора и рабочая частота преобразователя f , то в качестве альтернативы 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) указаны рекомендуемые максимальные значения для пульсирующего тока. Ограничивающим фактором является повышение температуры, которое вызвано мощностью, рассеиваемой внутри конденсатора. Мощность, рассеиваемая в конденсаторе из-за пульсаций тока, вычисляется как:

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

а полученное в результате повышение температуры будет равно:

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

где kA — это теплопроводность конденсатора, которая есть не что иное, как тепловое сопротивление k по отношению к площади поверхности конденсатора A в раз. Теплопроводность измеряется в °C/Вт.

Измерение тока пульсаций — это не легкая задача, вот почему 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

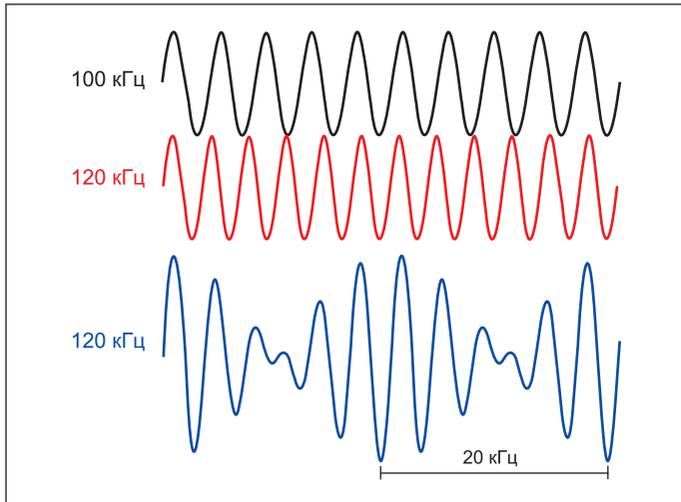


Рис. 8. Помеха в виде частоты биений (интерференции)

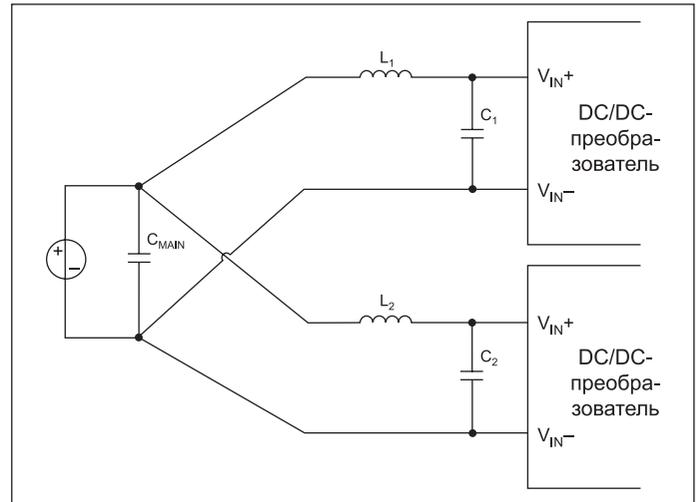


Рис. 9. Фильтрация помехи в виде частоты биений (интерференции)

сти с нагрузкой) и системы питания с резервированием (системы питания типа N+1). Каждый DC/DC-преобразователь в таких системах генерирует 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, а другой — 120 кГц. Гармонический анализ покажет нам три частотные линии в спектре — 100, 120 кГц и разность этих частот 20 кГц. Эту низкочастотную перекрестную помеху (интерференцию), то есть частоту биений, чрезвычайно трудно отфильтровать (рис. 8).

Помеху с частотой биений можно устранить путем использования индивидуальной фильтрации для входов каждого из DC/DC-преобразователей (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 довольно низкие. Дроссели с индуктивностью в пределах от 22 до 220 мкГн типичны для подобных 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 π -фильтр, образованный элементами C_{MAIN} - L - C , оказывается весьма полезным для дальнейшего общего снижения уровня помех.

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 должен быть как можно ниже. Чтобы избежать дальнейших последствий перекрестной интерференции, все соединения должны собираться в районе выходных клемм первичных преобразователей, то есть следует использовать подключение типа «звезда».

Выходная фильтрация

Как показано в разделе 2 [1], все DC/DC-преобразователи имеют присущий им некоторый уровень пульсаций выходного напряжения и помехи (рис. 10).

Фильтрация выходных пульсаций и помех требует применения двух различных подходов. Это вызвано тем, что по своей природе сами пульсации являются асимметричными (дифференциальными), тогда как помехи

в виде пик представляют собой симметричные (синфазные) помехи.

Дифференциальный способ фильтрации выходного напряжения

Самый простой способ подавить пульсации выходного напряжения — добавить дополнительный конденсатор непосредственно на выход преобразователя (рис. 11). Такой дополнительный конденсатор C_{EXT} будет работать параллельно с внутренним конденсатором преобразователя C_{OUT} .

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

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

Как видно из уравнения, добавление внешней емкости позволяет уменьшить пульсации напряжения. Например, если на выходе двухполупериодного выпрями-

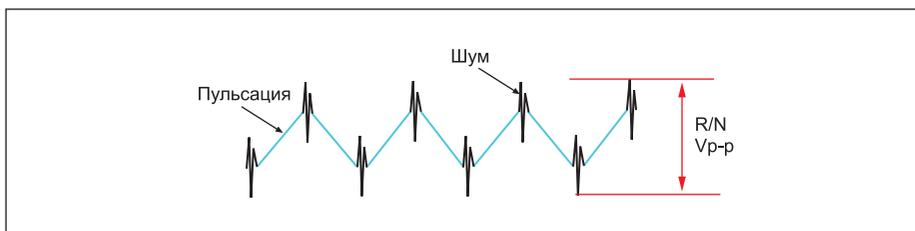


Рис. 10. Пульсации и помехи на выходе DC/DC-преобразователя

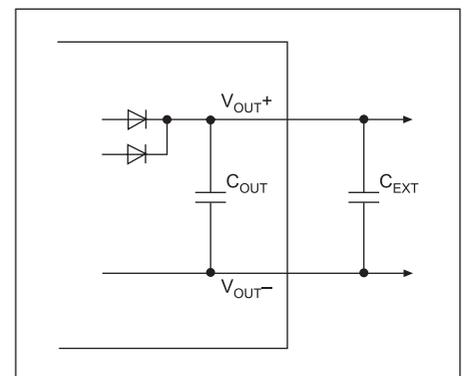


Рис. 11. Фильтрация пульсаций выходного напряжения путем использования дополнительного внешнего конденсатора

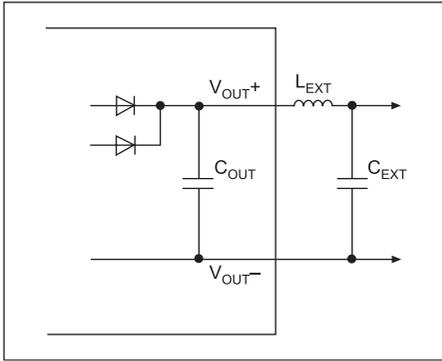


Рис. 12. Фильтрация пульсаций выходного напряжения путем использования внешнего LC-фильтра

теля 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. Добавление 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, необходимо иметь общую емкость конденсаторов уже 90 мкФ. Другими словами, нужно добавить внешний конденсатор на 68 мкФ.

Для еще большего уменьшения пульсаций, например до 20 мВ, потребуется уже конденсатор емкостью 2500 мкФ. Однако столь высокая выходная емкость может привести к проблеме запуска DC/DC-преобразователя, а также отрицательно сказаться 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).

При добавлении выходной индуктивности L_{EXT} расчет уровня выходных пульсаций выполняется по формуле:

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

Для сравнения используем условия предыдущего примера, если индуктивность дросселя L_{EXT} равна, допустим, 100 мкГ, то в этом случае выходное напряжение пульсаций 20 мВ может быть достигнуто с выходным конденсатором C_{EXT} емкостью всего лишь в 645 мкФ. Это немного меньше, чем 2500 мкФ без дросселя. Однако необходимо убедиться, что выбранный дроссель рассчитан на максимальный рабочий выходной

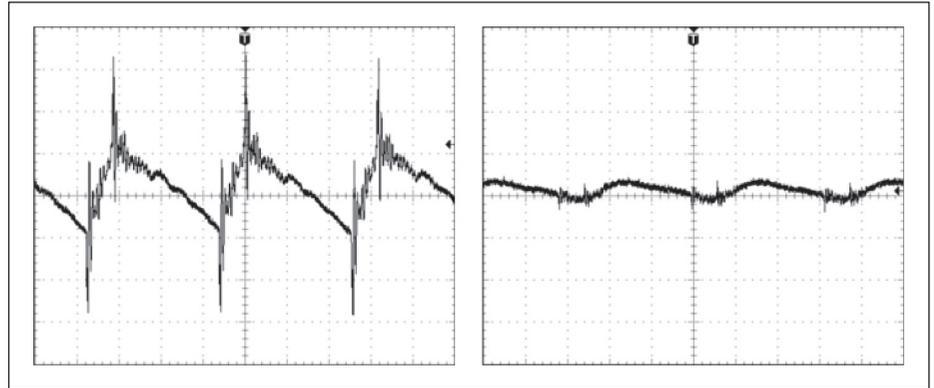


Рис. 13. Сравнение пульсаций входного напряжения до и после использования фильтра

ток, потребляемый 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 ослаблен на 30%. Поскольку LC-фильтр нижних частот относится к фильтрам второго порядка, которые имеют затухание -40 дБ/дек, то сигнал с частотой, которая в 10 раз выше, чем частота среза фильтра, будет уменьшен в 100 раз (рис. 13).

Фильтрация симметричных (синфазных) помех

Как уже упоминалось, сигнал выходной помехи имеет две составляющие — несимметричную (дифференциальную) и синфазную (симметричную). Повторимся: по своей природе пульсация — это в основном дифференциальная помеха, а шумы и пики — обычно синфазные (симметричные) помехи. Поскольку симметричный сигнал в виде помех присутствует на всех выходах одновременно, он не может быть «увиден» выходной емкостью, и добавление выходного LC-фильтра не уменьшит помехи такого рода. Синфазные помехи не были бы столь 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 тоже необходимо как-то решать. Есть два способа

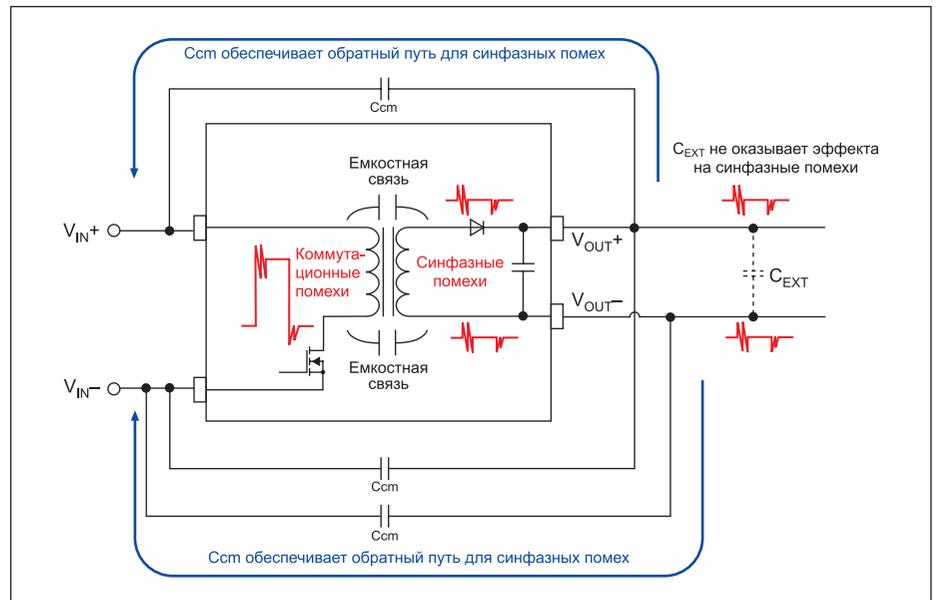


Рис. 14. Конденсаторы для подавления синфазных шумов и помех в изолированном DC/DC-преобразователе

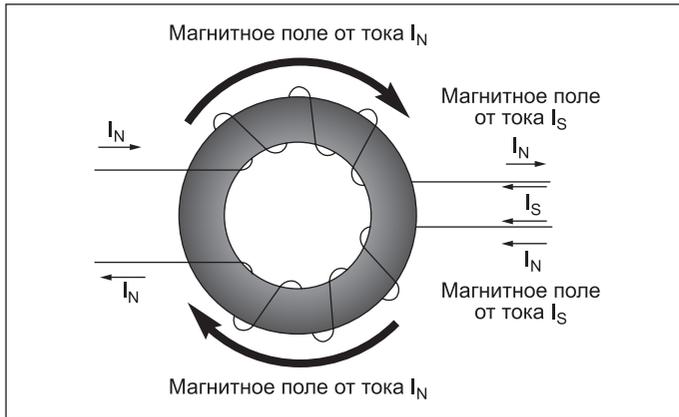


Рис. 15. Принцип работы синфазного дросселя

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 (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 обратный путь может быть обеспечен с помощью внешних конденсаторов, выбранных так, чтобы предложить низкоимпедансный путь для тех частот, на которых проявляется эта помеха, а вернее, с учетом ее основного спектра.

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

Синфазные дроссели

В некоторых приложениях бывает крайне нежелательно иметь конденсаторы, блокирующие изоляционный барьер, то есть элементы, установленные между общими шинами первичной и вторичной цепей. Например, у медицинского оборудования есть строгие требования по ограничению тока утечки, который может быть превышен, если мы будем иметь такой путь для тока через изоляционный барьер с низким импедансом для высоких частот. В этих случаях необходимо использовать спе-

циальный синфазный дроссель. Особенность такого дросселя состоит в том, что у него предусмотрены две обмотки, намотанные в противоположных направлениях (рис. 15).

Благодаря наличию противофазных обмоток синфазные токи I_S будут генерировать разностный магнитный поток в сердечнике, поскольку они текут в одном направлении. Таким образом, возникающий при этом импеданс эффективно гасит синфазные составляющие тока. Асинхронные, дифференциальные токи, проходя через дроссель, формируют возвращаемые токи I_N , которые не производят разностный магнитный поток и, следовательно, в дросселе они не затухают. Данный подход обладает существенным преимуществом: сердечник дросселя не входит в насыщение даже при наличии очень больших дифференциальных токов, поэтому для подавления синфазных составляющих в синфазных дросселях могут быть использованы сердечники с высокой магнитной проницаемостью без риска перегрева из-за прохождения через него дифференциальных составляющих общего тока.

На рис. 16 показано, как синфазные дроссели используются для фильтрации выходного напряжения в DC/DC-преобразователях. Одна обмотка дросселя включена последовательно в цепи выходного напряжения V_{OUT+} , а другая — последовательно в цепи возвратного тока V_{OUT-} . Импеданс синфазного дросселя выбирают с учетом того, чтобы его максимум попал в область спектра синфазных помех с самой большой мощностью, как правило, она лежит в диапазоне частот 10–100 МГц. Однако в общем случае из-за высокой проницаемости материала сердечника синфазные дроссели эффективно подавляют синфазные помехи и шумы в более широком диапазоне частот.

Принцип подавления помех с помощью синфазного дросселя может быть использован и для преобразователей с двуполярным выходом. В таких преобразователях синфазные шумы и помехи появляются одновременно на всех трех его выходах, и их весьма сложно отфильтровать при помощи стан-

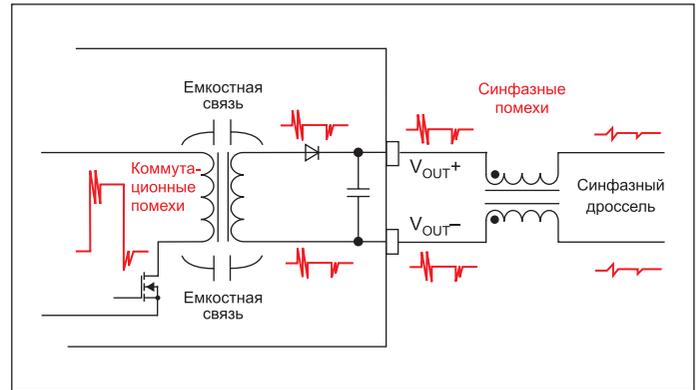


Рис. 16. Использование синфазного дросселя в качестве выходного фильтра DC/DC-преобразователя

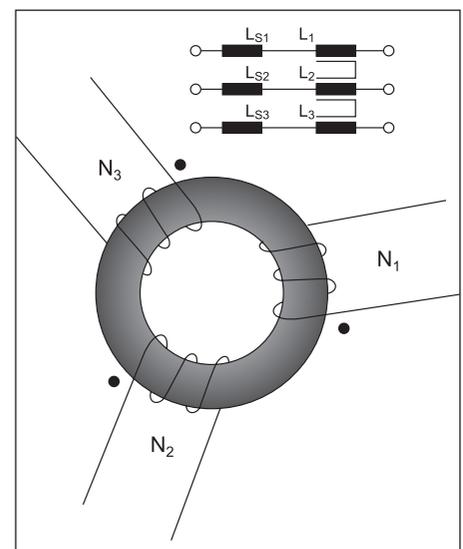


Рис. 17. Синфазный дроссель с тремя обмотками

дартных синфазных дросселей с двумя обмотками. Решение заключается в применении синфазного дросселя с тремя обмотками. У такого дросселя есть весьма полезный побочный эффект: он может быть также использован для фильтрации дифференциальных шумов и помех путем добавления двух дополнительных конденсаторов (рис. 17).

Три обмотки такого дросселя намотаны на сердечнике раздельно и отделены друг от друга. Это необходимо, чтобы достичь некоторого приемлемого уровня индуктивности рассеивания L_S между обмотками. При выборе материала сердечника важно иметь высокую магнитную проницаемость, чтобы число витков в обмотке и, следовательно, сопротивление меди было небольшим. Для расчета индуктивности подобного дросселя применяются следующие соотношения:

$$N = N_1 = N_2 = N_3 \text{ — количество витков;}$$

$$L_C = L_1 = L_2 = L_3 \text{ — индуктивность;}$$

$$L_C = N^2 A_L \text{ — индуктивность каждой обмотки.}$$

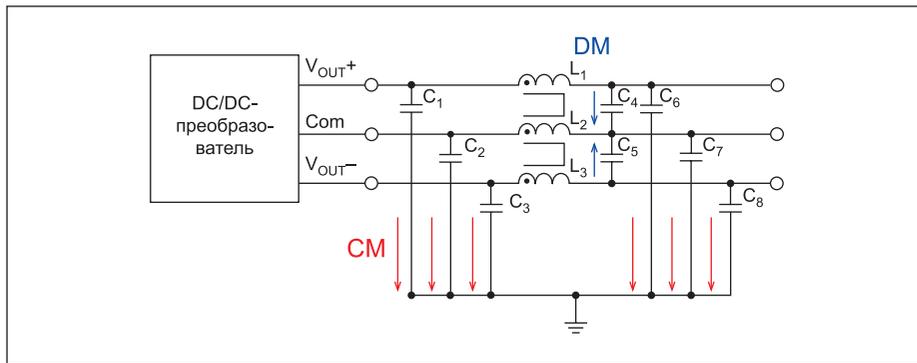


Рис. 18. Синфазный дроссель с тремя обмотками как комбинированный выходной фильтр DC/DC-преобразователя

Коэффициент индуктивности A_L соответствует индуктивности катушки (выполненной на данном сердечнике, приводится в его спецификации) в один виток ($\text{нГн}/N^2$) и зависит от материала сердечника и его геометрии. Индуктивность рассеяния между обмотками L_S обычно составляет около 3% от индуктивности обмотки L_C . Она может быть использована для фильтрации высокочастотных дифференциальных помех. В последнем случае применяются два дополнительных конденсатора (рис. 18).

Синфазные конденсаторы C_1 – C_3 обеспечивают путь с низким импедансом для синфазных шумов и помех на общий провод («землю») первичной цепи. Для этой цели должны использоваться высоковольтные керамические конденсаторы номиналом 1–10 нФ. Здесь, конечно, можно применять и многослойные керамические конденсаторы, но лишь в том случае, если требование по пробивному напряжению изоляции изделия невысоко. В зависимости от внутренней структуры DC/DC-преобразователя можно обойтись без конденсаторов C_1 и C_3 . Дифференциальные конденсаторы C_4 и C_5 в сочетании с индуктивностью рассеяния между обмотками L_1/L_2 и L_2/L_3 образуют низкочастотный фильтр для дифференциальных помех и шумов. Номинал конденсаторов C_4 и C_5 , как правило, выбирают более

1 мкФ, и в этом случае применение многослойных керамических конденсаторов будет правильным и оправданным.

Все симметричные шумы и помехи, которые проходят через дроссель из-за наличия емкостной связи между обмотками, могут быть зашунтированы на «землю» с помощью второго набора синфазных конденсаторов. На схеме рис. 18 это конденсаторы C_6 – C_8 . Индуктивность каждой обмотки дросселя L_C составляет, как правило, несколько сотен миллигенри, так что для расчета дифференциального фильтра индуктивность рассеяния L_S можно брать на уровне 5–10 мкГн.

Для вычислений дросселя с тремя обмотками могут быть использованы следующие формулы:

1. Дифференциальный режим:

$$C_{DM} = C_4 = C_5$$

$$f_{r,DM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_S C_{DM}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0,03 L_C C_{DM}}};$$

2. Синфазный режим:

$$C_{CM} = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = C_7 = C_8$$

$$f_{r,CM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_C C_{CM}}},$$

где C_{CM} — синфазные конденсаторы, C_{DM} — дифференциальные конденсаторы.

Полная максимальная фильтрация

Синфазный дроссель также может быть использован для борьбы с симметричными помехами и на первичной стороне преобразователя. Поскольку дифференциальная входная токовая помеха может быть очень большой по отношению к синфазной (имеется в виду пусковой ток и пульсации), то иногда складывается ложное представление о том, что о синфазных помехах не следует беспокоиться. Но для обеспечения общей электромагнитной совместимости часто требуется именно их подавление. Схема DC/DC-преобразователя с полной фильтрацией приведена на рис. 19.

Следует подчеркнуть, что на практике во многих приложениях могут потребоваться не все компоненты из показанных на рис. 19. Такой полный фильтр должен использоваться только в соответствии с четко осознанной потребностью, поскольку применение дополнительных компонентов приведет к снижению общей эффективности и увеличению себестоимости конечного продукта. В некоторых приложениях для обеспечения электромагнитной совместимости вполне достаточно лишь входного конденсатора C_3 и одного или нескольких синфазных конденсаторов и дросселей.

Для того чтобы уменьшить номенклатуру необходимых для сборки преобразователя компонентов, в качестве дифференциаль-

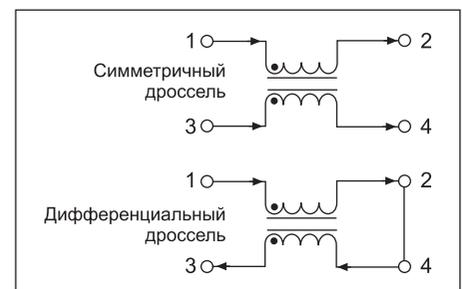


Рис. 20. Использование синфазного дросселя в роли дифференциальной индуктивности

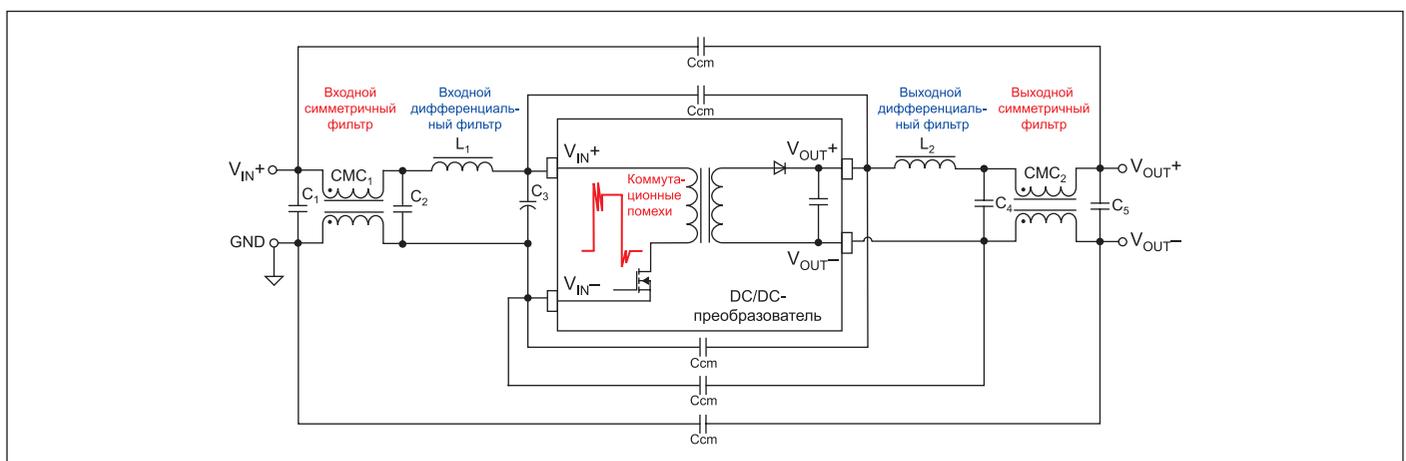


Рис. 19. Полное подавление шумов и помех в DC/DC-преобразователе

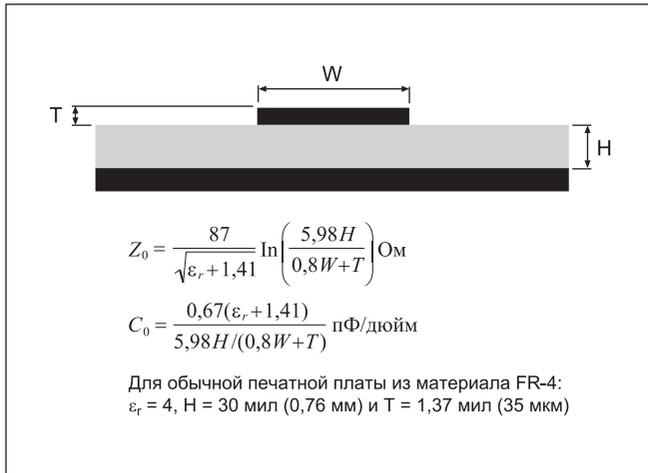


Рис. 21. Расчет характеристического импеданса и емкости проводников печатной платы

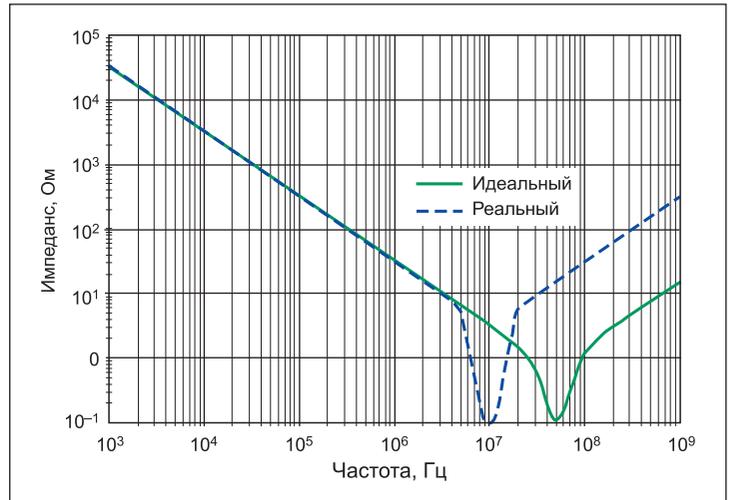


Рис. 23. Собственная резонансная частота конденсатора

ного дросселя можно использовать синфазный дроссель. Это реализуется путем изменения в соединении его обмоток (рис. 20). То есть при необходимости можно сделать $СМС_1 = L_1$ и $СМС_2 = L_2$. Это особенно полезно, если для сборки применяются SMD-дроссели. В таком случае для четырех катушек индуктивности будут использоваться только два питателя раздатчика.

Разводка фильтра на печатной плате

Для эффективного функционирования входного и выходного фильтров решающее значение имеет их компоновка на печатной плате. Как уже было сказано, входной конденсатор следует устанавливать как можно ближе к выводам входа преобразователя. Чтобы избежать ухудшения фильтрации, необходимо использовать конденсаторы хорошего качества с ESR в миллиомах, импеданс любого соединения между конденсатором и входами преобразователя также не должен превышать нескольких миллиом. Используя нижеприведенное уравнение, можно выполнить расчет активного сопротивления печатного проводника *Track Resistance*:

$$\text{Track Resistance} = \text{Resistivity} \times \frac{\text{Length}}{\text{Thickness} \times \text{Width}} \times [1 + (\text{TempCo} \times (\text{Temp} - 25))].$$

где *Track Resistance* — сопротивление печатного проводника; *Resistivity* — удельное сопротивление (удельное сопротивление меди $1,7 \times 10^{-6}$ Ом/см); *Length* — длина печатного проводника; *Thickness* — толщина печатного проводника; *Width* — ширина печатного проводника; *TempCo* — температурный коэффициент сопротивления (для меди $\text{TempCo} = +0,393\%/^{\circ}\text{C}$); *Temp* — температура печатного проводника.

Обычная печатная плата имеет толщину меди 35 мкм, так что проводник шириной 1 мм и длиной 1 см будет при температуре +25 °C иметь сопротивление по постоянному току, равное почти 5 мОм, с увеличением до 6 мОм при температуре +85 °C. (Для расчетов можно воспользоваться онлайн-калькулятором [2]. — Прим. переводчика.)

Помимо сопротивления по постоянному току, необходимо учитывать и сопротивление печатного проводника по переменному току, то есть его импеданс (полное сопротивление). Проводник печатной платы обладает как индуктивностью, так и распределенной емкостью по отношению к другим дорожкам платы и установленным на нее компонентам. Это может привести к неожиданным результатам в части наводки помех вследствие емкостной или индуктивной связи между дорожками, слоями и непосредственно с компонентами. Например, верхняя дорожка печатной платы, проходя над другой дорожкой на нижней стороне печатной платы или над шиной в теле печатной платы (если это многослойная печатная плата), будет обладать характеристическим импедансом Z_0 и емкостью C_0 в соответствии с уравнениями (рис. 21).

Исходя из вышесказанного, важно, чтобы используемые в схеме фильтрации проводники на печатной плате не проходили

над или вблизи других, особенно сигнальных проводников. В идеале двусторонняя или многослойная плата должна использоваться так, чтобы шины заземления могли формироваться непосредственно под или рядом с помехоподавляющими компонентами. Если печатная плата односторонняя, то соединения должны быть максимально короткими и широкими (рис. 22).

Компоненты фильтров также должны быть рассмотрены как реальные, а не идеальные компоненты. Это означает, что на высоких частотах паразитная индуктивность конденсатора или паразитная емкость катушки индуктивности может взять на себя инициативу в определении поведения компонента. Другими словами, конденсаторы начинают вести себя как катушки индуктивности, и наоборот. Резисторы могут вести себя либо как индуктивности, либо как конденсаторы.

При умелом подборе компонентов эти проблемы можно нейтрализовать или полностью их устранить. Наиболее важным критерием при конструировании является учет собственной резонансной частоты компонента, то есть той точки его амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), где характер его поведения изменяется. В качестве примера на рис. 23 для такого элемента, как конденсатор, показан график зависимости импеданса от частоты.

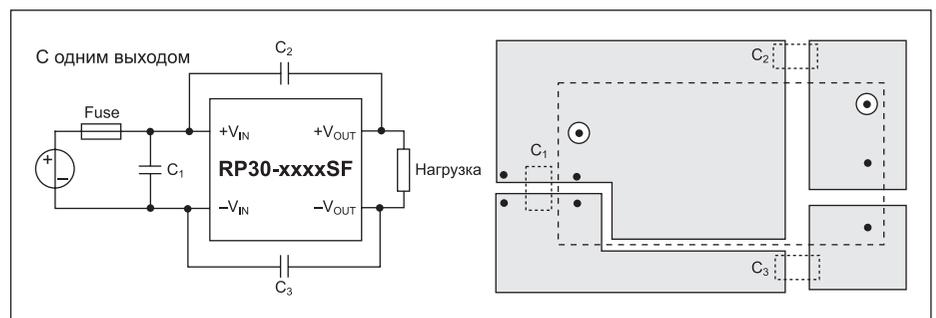


Рис. 22. Пример компоновки на печатной плате простого фильтра для обеспечения требований класса А. Разводка печатной платы показана с преобразователем серии RP30-SF

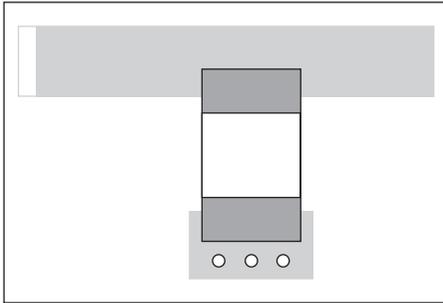


Рис. 24. Пример многоточечного подключения вывода элемента к общему проводу

Сплошная линия на графике показывает АЧХ конденсатора емкостью 4,7 нФ, имеющего эквивалентное последовательное сопротивление $ESR = 0,01$ Ом и собственную эквивалентную индуктивность $ESL = 2,5$ нГн. Пунктирная линия показывает тот же конденсатор, для которого было смоделировано недостаточно качественное размещение на плате, в частности подключение. К имеющемуся ESR такое подключение добавило 50 мОм, а к ESL — 50 нГн. Как видно из графика, резонансная частота сместилась в более низкую область частот, а это означает, что конденсатор начнет вести себя уже как индуктивность на частоте в одну десятую от собственной резонансной частоты, указанной в спецификации.

Для конструкции печатной платы, представленной на рис. 22, особенно важно, чтобы значение ESR и ESL для подключенного к общему проводу («земле») вывода конденсатора было настолько низким, насколько это воз-

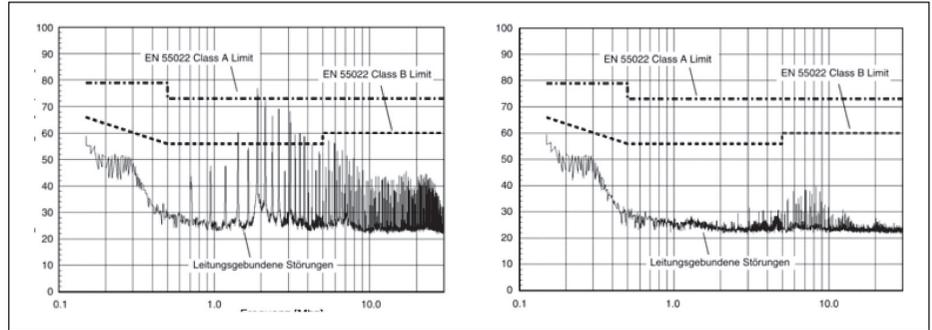


Рис. 25. Пример измерения шумов и помех до и после их фильтрации

можно. Данное требование нельзя выполнить путем простого электрического соединения с общим проводником через одно-единственное проходное отверстие печатной платы — для этого необходимо несколько отверстий (рис. 24). Такой подход приведет к снижению сопротивления как по постоянному току, так и импеданса в целом, то есть с учетом сопротивления и по переменному току.

Для индуктивностей (в рассматриваемом случае — дросселей фильтров) длина соединительного проводника не имеет значения, поскольку длинный проводник будет только увеличивать общую индуктивность. Тем не менее будет правильным установить индуктивности как можно ближе к источнику помех и возможной интерференции.

При разводке любых описанных здесь фильтров особое внимание должно быть уделено протекающим в цепи токам. Любой ток, протекающий в контуре, будет генерировать электромагнитное поле, которое может ин-

дуцировать шум и помехи в других частях схемы. В идеале для подключения к общему проводнику (заземлению) необходимо использовать соединения типа «звезда», когда все обратные токи будут течь к одной общей точке заземления. Если же петля все же окажется неизбежной, то площадь такого контура должна быть как можно меньшей.

С хорошо разведенной печатной платой и правильным выбором компонентов результаты подавления пульсаций, шумов и помех DC/DC-преобразователя могут быть весьма впечатляющими. Наглядный практический пример приведен на рис. 25.

Литература

1. Roberts S. DC/DC Book of Knowledge Practical tips for the User. RECOM Second Edition, 2015.
2. The CircuitCalculator.com Blog. A blog with live web calculators. www.circuitcalculator.com/wordpress/2006/01/24/trace-resistance-calculator