

Сокращение кондуктивных помех импульсных источников питания в два приема

Антон ЕРЕМИН,
ae@crels.ru

Импульсные источники питания характеризуются кондуктивными шумами, наводимыми на сеть питания. К сожалению, доля затрат на разработку источника питания системы обычно не превышает 5% от общего бюджета. Недостаток внимания к конструкции импульсных источников питания часто приводит к провалу испытаний оборудования по уровню кондуктивных шумов и к необходимости последующей доработки.

При разработке фильтров для импульсных источников питания требуется понимать, что эти фильтры становятся частью модулей, влияя на цепи обратной связи и передаточную характеристику «вход–выход». Задача фильтрации кондуктивных помех как таковая не является неразрешимой. Сложности при ее решении возникают тогда, когда установка сетевого фильтра не была предусмотрена на стадии выбора компоновки и конструктору остается довольствоваться оставшимся пространством внутри прибора. Таким образом, основной задачей разработчика является обеспечение необходимого уровня подавления кондуктивных помех с учетом фактических габаритных ограничений.

Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) в отношении кондуктивных помех должно быть выполнено в соответствии с классическим ступенчатым принципом ослабления воздействия на пути от источника к приемнику. При использовании этого принципа к импульсным источникам питания необходимо, в первую очередь, снизить уровень генерируемых помех

до минимально возможного и только после этого приступить к разработке фильтра. Это поможет улучшить массогабаритные характеристики создаваемой аппаратуры. Таким образом, в качестве первого шага на пути улучшения параметров ЭМС импульсного источника питания мы должны рассмотреть механизмы возникновения кондуктивных сетевых помех и возможные меры по ограничению их генерации.

Шаг 1. Ограничение уровня генерируемых помех

Импульсные источники питания генерируют не только дифференциальные кондуктивные помехи, но и синфазные. Дифференциальную помеху можно обнаружить между выводами источника, а синфазную – между каждым выводом и системой заземления.

Первый источник дифференциальных помех – паразитные параметры сглаживающего конденсатора C_{ϕ} , установленного между выпрямительным мостом и коммутатором, как показано на рис. 1.

Для идеального конденсатора импульсный ток должен быть замкнут через конденсатор фильтра C_{ϕ} по контуру, выделенному на рис. 1 синим цветом. Однако из-за наличия у этого конденсатора паразитной индуктивности и последовательного сопротивления напряжения на конденсаторе при протекании импульсного тока имеет вид, приведенный на рис. 2. В этом примере частота переключения коммутатора составляет 300 кГц, входной ток – 2 А, скорость изменения тока – 50 А/мкс. Конденсатор емкостью 100 мкФ характеризуется паразитной индуктивностью 0,5 нГн и последовательным сопротивлением 10 мОм. Эти нежелательные параметры приводят к тому, что напряжение на фактическом конденсаторе выше, чем на идеальном конденсаторе.

В результате часть импульсного тока проникает в имитатор сети через паразитную емкость смещенных в обратном направлении диодов выпрямительного моста (см. красную штриховую линию на рис. 1). Таким образом, чем меньше паразитная индуктивность и последовательное сопротивление конденсатора, тем большая доля

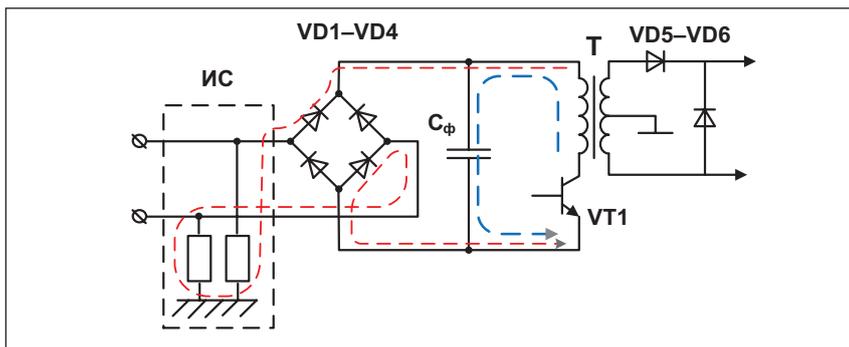


Рис. 1. Схема проникновения дифференциальных импульсных токов в имитатор сети (ИС) при испытаниях

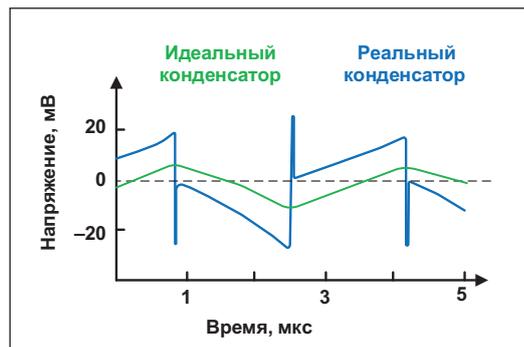


Рис. 2. Напряжение на конденсаторе C_{ϕ} при протекании импульсного тока

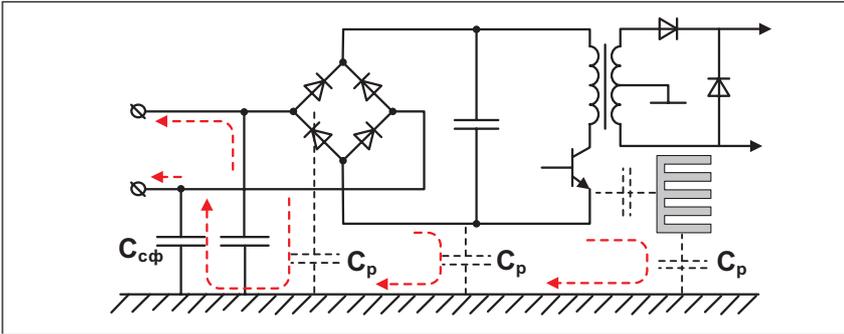


Рис. 3. Пути протекания синфазных высокочастотных токов через паразитные емкостные связи с корпусом

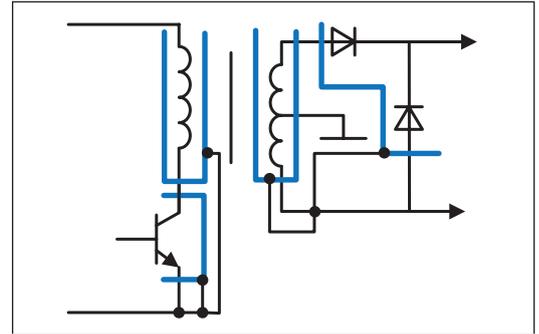


Рис. 4. Типовое расположение экранов в составе импульсного источника питания и схема их подключения

тока коммутатора может быть локализована в контуре конденсатор–коммутатор и меньшая доля тока проникнет в имитатор сети при испытаниях [1].

Второй источник дифференциальных помех – диоды выпрямительного моста. От характеристики времени восстановления обратного сопротивления диода после протекания тока и емкости перехода зависят амплитуда и спектральный состав помех, генерируемых диодным мостом. Время восстановления, в свою очередь, зависит от времени рассасывания заряда в диффузионной области кристалла и времени спада заряда. Например, у импульсных диодов время восстановления обычно составляет доли микросекунд. Кроме того, емкость р-п-перехода диода при определенных условиях может образовать с индуктивностью выводов и печатных проводников резонансный контур с высокой добротностью.

Причиной синфазных кондуктивных помех являются токи в локальной поверхности заземления, представленной, как правило, токопроводящим корпусом источника. Эти токи проникают в корпус через емкостные связи с высокочастотными элементами или линиями их подключения в соответствии с рис. 3 и замыкаются на линии питания через конденсаторы фильтра синфазных помех. В отсутствие фильтра замыкание тока от высокочастотных элементов на линию питания происходит только через распределенные емкостные связи.

Дифференциальная помеха при этом представляет собой меньшую проблему, потому что для борьбы с ней можно установить между линиями питания конденсаторы большей емкости, чем между каждой линией и корпусом. Распространение синфазных токов по линиям питания, в свою очередь, приводит к образованию излучаемых помех.

Неэкранированный импульсный источник питания – относительная редкость, так как без экранирующего корпуса почти невозможно пройти испытания на требования к излучаемым помехам. Этот же корпус часто считают удачным средством для отвода тепла и потому крепят к нему силовые переключающие транзисторы, гальванически изолировав их от стенки. Однако при этом часто за-

бывают о существовании емкостных высокочастотных связей.

У транзисторов в корпусах ТО-3 с площадью монтажного фланца 5 см² при установке на слюдяную прокладку толщиной 100 мкм емкость может достигать 155 пФ, а у транзисторов в корпусах ТО-220 на прокладке из силиконовой резины толщиной 200 мкм емкость можно уменьшить до 36 пФ. Токи утечки от силовых коммутаторов через емкостную связь могут не вызывать проблем с точки зрения безопасности, но, распространяясь по корпусу источника питания, они приводят к образованию высокочастотных потенциалов. Эти повышенные потенциалы, в свою очередь, являются источниками электрического поля помехи. Следовательно, корпус источника питания должен иметь низкоимпедансное соединение с физической землей или корпусом основного изделия.

Таким образом, наличие экранирующего корпуса вблизи высокочастотных элементов – основная причина возникновения синфазной помехи. Увеличение его размера может ослабить нежелательное взаимодействие, однако использование этого приема обычно нежелательно, а иногда и вовсе невозможно в случае с компактным оборудованием. Исключение из конструкции корпуса как такового практически решает проблему синфазных кондуктивных помех от источника, заменив ее проблемой, обусловленной излучаемыми помехами. При этом на уровень дифференциальных кондуктивных помех наличие или отсутствия корпуса не влияет [2].

Таким образом, прежде всего следует уменьшить связь высокочастотных эле-

ментов с корпусом импульсного источника питания. Для этого используют электростатические экраны между обмотками трансформатора, а также между высокочастотным переключателем и радиатором. Полезно также увеличить расстояние между корпусом высокочастотного коммутатора и радиатором.

Электростатические экраны обычно изготавливают из медной фольги и гальванически изолируют не только от корпуса высокочастотного элемента, но и от корпуса импульсного источника питания. Экраны на стороне первичной обмотки трансформатора обычно подключают либо к минусу источника постоянного тока, либо к нейтрали источника переменного тока как можно ближе к коммутирующему элементу. Экраны на стороне вторичной обмотки подключают к ее общему выводу. Однако если выходное напряжение относительно невелико, например меньше 12 В, то экранирование на стороне вторичной обмотки, как правило, не требуется. На рис. 4 показано типовое расположение экранов и точки их подключения.

Пример монтажа силового транзистора на кронштейн, электрически изолированный и от транзистора, и от стенки корпуса или радиатора охлаждения, показан на рис. 5а. Соединив этот кронштейн с линией питания в соответствии с рис. 4, мы получим электрический отклоняющий экран, который не позволит высокочастотным токам проникнуть в корпус [3]. Если тепло передается непосредственно на корпус, то в качестве экрана можно использовать тонкий слой фольги, изолированный от обеих прилегающих поверхностей, как показано на рис. 5б.

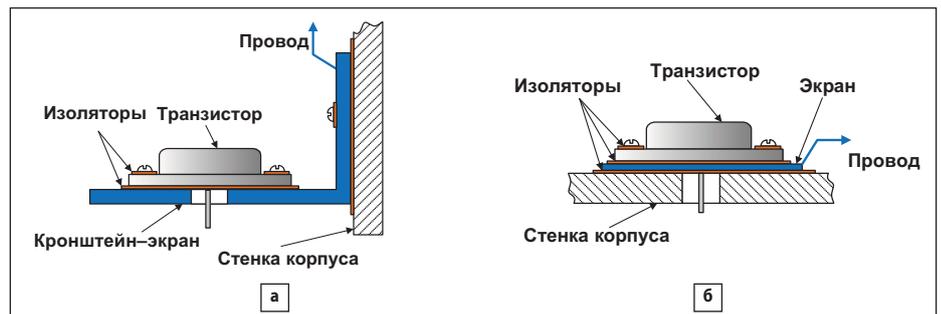


Рис. 5. Примеры монтажа силового транзистора с электрическим экранированием на: а) кронштейн-экран; б) стенку корпуса с фольговым экраном

Трансформатор импульсного источника питания должен иметь как минимум один электрический экран на первичной обмотке. Иногда по соображениям безопасности требуется дополнительный «защитный» экран для отвода токов короткого замыкания. Отличия защитного экрана от экрана электрического поля состоят в его конструкции, расположении и подключении.

Защитный экран изготавливается из фольги толщиной 50–100 мкм, чтобы обеспечить необходимую для отвода токов короткого замыкания проводимость. Его располагают между двумя электрическими экранами и изолируют от них, как показано на рис. 6.

В отличие от электрического экрана, защитный экран подключают к корпусу, а не к обратному проводу питания. Это подключение должно выдерживать ток, превышающий ток прожига предохранителя как минимум в три раза. Для электрического экрана токонесящая способность соединения совершенно не критична, а важен, прежде всего, его высокочастотный импеданс. На рис. 7 приведена схема подключения двух экранов электрического поля и одного защитного экрана между ними (сердечник трансформатора не показан).

Для соответствия повышенным требованиям безопасности электрический экран первичной обмотки иногда соединяется с обратным проводом через конденсатор. Емкость конденсатора – более 0,01 мкФ при рабочем напряжении не менее напряжения первичной цепи. Экран электрического поля представляет собой лист фольги с изоляционным покрытием, уложенный вокруг первичной обмотки с перекрытием слоев. Изоляционное покрытие должно предотвращать гальванический контакт слоев в зоне перекрытия, чтобы не образовалось замкнутое кольцо, компенсирующее магнитный поток обмотки.

Подключение электрического экрана лучше делать не в углу листа фольги, а в его центре. При подключении в углу листа однонаправленные наведенные шумовые токи вызывают появление магнитного высокочастотного поля, наводимого на вторичную обмотку, что ухудшает эффективность изоляции шума. Если подключить экран в центре, например, нижнего края, то электрическое поле помехи приведет к появлению токов двух противоположных направлений приблизительно равных по амплитуде. Результирующее магнитное поле таких токов в соответствии с принципом суперпозиции близко к нулю.

Экранирование трансформаторов дает не только заметные преимущества, но и накладывает ограничения, которые необходимо учитывать при разработке. Например, большой размер обмотки экранированных трансформаторов ухудшает массогабаритные характеристики изделия и увеличивает магнитное поле рассеяния, то есть негативно влияет на характеристики трансформатора.

Отдельную проблему электромагнитной совместимости при разработке импульсных источников питания представляют собой катушки и трансформаторы с воздушным зазором сердечника. Этот зазор обычно помогает предотвратить насыщение сердечника при протекании значительных рабочих токов. Несмотря на наличие электрических экранов между обмотками, трансформатор может стать источником магнитного поля помехи, создаваемого зазорами. При этом зазоры в наружных магнитопроводах являются источником более интенсивных помех, чем во внутреннем магнитопроводе. Уменьшить излучение из этих зон помогает экранирующее гальванически замкнутое кольцо, уложенное поверх зазора, как показано на рис. 7.

Экран располагают в плоскости витков катушки и центрируют относительно зазора. Ширина кольца должна составлять около трети длины катушки, а толщина медной фольги – не менее 250 мкм. При большей ширине кольца могут появиться проблемы с насыщением сердечника.

К сожалению, как и для электрических экранов, установка экранирующего кольца ведет к росту потерь в трансформаторе до 1% от номинальной мощности в зависимости от размера зазора и номинальной мощности компонента. Причиной этих потерь являются вихревые токи в медном замкнутом экране, которые увеличивают выделение тепла. Если оно в замкнутом контуре оказывается недопустимо велико, понадобится дополнительный радиатор для отвода тепла на корпус. Этот замкнутый экран иногда оставляют неподключенным в бюджетных устройствах. Однако его лучше подключить к общему проводу вторичной обмотки.

Провода, соединяющие модуль импульсного источника питания и наружный сетевой соединитель, также могут стать причиной провала испытаний на уровень кондуктивных помех. Эти провода даже при плотной параллельной укладке образуют приемный контур для внутриблочных помех. Для снижения уровня принимаемых помех необходимо плотно свить провода друг с другом, чтобы обеспечить компенсацию наведенной помехи множеством противоположно направленных контуров. Аналогичный эффект достигается путем установки на эти провода ферритового фильтра, но скрутка обычно является более дешевым и быстрым способом решения проблемы принимающего контура.

Если кондуктивные помехи после скручивания проводов уменьшились недостаточно, возможно, стоит найти источник помехового поля внутри оборудования и экранировать его. Если источником помех являются синфазные токи в интерфейсных сигнальных кабелях, то может потребоваться перепрограммирование системы заземления прибора. В отдельных случаях [4] предлагается использовать для снижения всех видов помех

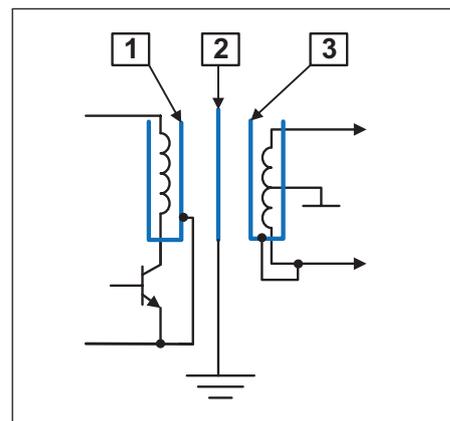


Рис. 6. Схема подключения электрических экранов первичной обмотки (1), вторичной обмотки (3) и дополнительного защитного экрана (2)

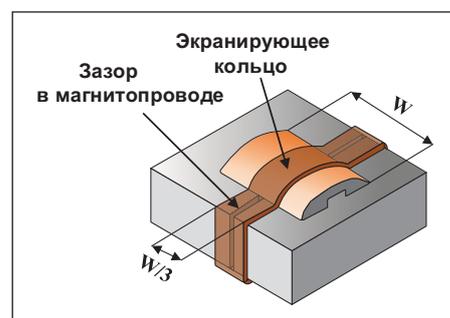


Рис. 7. Расположение экранирующего кольца на сердечнике трансформатора

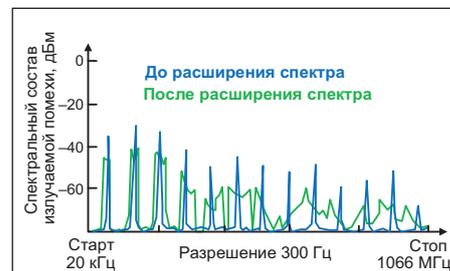


Рис. 8. Влияние метода расширения спектра на амплитуду гармоник излучаемой помехи

импульсных преобразователей напряжения так называемый метод расширения спектра. Основа этого метода – модуляция частоты переключения с сохранением средней частоты переключения на приемном уровне. В результате максимумы излучения, соответствующие постоянной частоте переключения и ее гармоникам, оказываются размыты в частотной области с одновременным уменьшением амплитуды этих пиков. На рис. 8 показано влияние модуляции частотой 400 Гц на уровень излучения преобразователя постоянного тока с базовой частотой переключения 84 кГц.

В левой части спектра метод расширения спектра позволил снизить уровень помех до 10 дБ, но с ростом частоты эффект расширения спектра усиливается и ослабление помех отдельных гармоник может достигать 17 дБ.

Шаг 2. Фильтрация кондуктивной помехи

Фильтры кондуктивных помех обычно выполняют одноэлементными или двухэлементными. Трехэлементные фильтры и фильтры более высоких порядков используются реже, когда необходимо обеспечить больший наклон характеристики потерь. Такое увеличение применяется, если требуемая частота среза, например двухэлементного фильтра, оказывается слишком мала, а номиналы элементов для обеспечения этой частоты излишне велики. При этом фильтры 4-го и больших порядков для нейтрализации помех обычно избыточны.

Типовая структура сетевого фильтра, состоящего из каскадов фильтрации синфазных помех и фильтрации дифференциальных помех, приведена на рис. 9. Такой порядок расположения каскадов подразумевает, что шум импульсного источника питания должен сначала поступить на фильтр дифференциальной помехи, а затем – на фильтр синфазной помехи. Однако имеется немало примеров, когда успешно применяется и обратная схема расположения, поэтому можно считать, что в этом случае нет жесткого правила.

Наконец, еще одним средством борьбы с кондуктивными помехами от импульсных источников питания могут стать конденсаторы, установленные непосредственно на вводе питания в прибор. Этот прием эффективен, когда электропроводка между импульсным блоком питания и наружным сетевым соединителем слишком чувствительна к внутренним помехам [5].

Из-за повышенной опасности повреждения импульсными помехами в сети питания конденсаторы на вводе питания должны быть испытаны на стойкость к таким помехам. Обычно для этой цели подходят керамические конденсаторы благодаря малому паразитному сопротивлению, что одновременно означает большую стойкость к перегрузкам импульсными токами.

При проектировании сетевых фильтров первым шагом является проектирование каскада для фильтрации синфазных помех. Современные исследования показывают, что когда синфазные кондуктивные помехи подавлены в достаточной мере, дифференциальный кондуктивный шум также существенно уменьшается. Первая причина этого – наличие индуктивности утечки у синфазного дросселя, образующей фильтр для дифференциальной помехи. Вторая причина – наличие двух конденсаторов, включенных между каждой линией питания и землей, которые в сумме образуют емкость для фильтрации дифференциальной помехи.

Таким образом, во избежание избыточности фильтра сначала разрабатывают каскад фильтрации синфазных помех, а затем

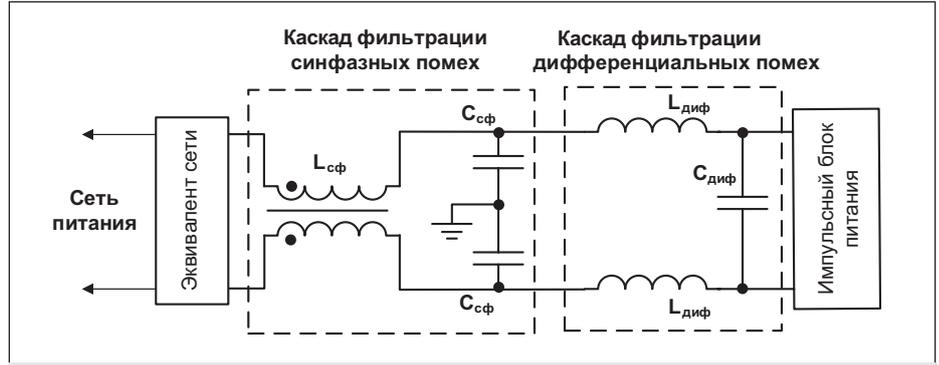


Рис. 9. Типовая структура сетевого фильтра

проводят конструкторские испытания для определения ее эффективности в отношении дифференциальной помехи. Если дифференциальные помехи превосходят обозначенные пределы, то добавляют каскад фильтрации дифференциальных помех. Для маломощных преобразователей дифференциальный фильтр часто является избыточным.

К сожалению, амплитуда шума, фиксируемого на резисторах эквивалента сети, – это всегда комбинация синфазных и дифференциальных помех. Традиционный метод их «разделения» состоит в измерении с помощью пробников с использованием различающихся схем измерения. Разработаны также дополнительные устройства для измерительных стендов, позволяющие подавить дифференциальную компоненту общего шума с эффективностью до 50 дБ [6].

Топология синфазного фильтра определяется импедансами «источника шума» и «приемника шума». Входной импеданс «источника шума», применяемого при испытаниях на уровень кондуктивных помех, составляет порядка 25 Ом. Этот импеданс образован двумя 50-Ом плечами эквивалента сети, включенными для синфазной помехи параллельно. Поскольку импеданс источника синфазного шума гораздо больше 25 Ом и имеет емкостную природу, конденсатор в каскаде фильтрации синфазной помехи лучше располагать со стороны источника шума, то есть импульсного источника питания, а индуктивность – со стороны эквивалента сети.

Для фильтрации синфазной помехи могут использоваться и фильтры больших порядков, но индуктивность синфазного дросселя обычно достаточно велика, чтобы ограничиться всего двумя ступенями. Трехступенчатые Т-фильтры синфазной помехи целесообразно использовать только при очень малых значениях импеданса «источника шума», что нетипично для импульсных источников питания.

Из-за относительно небольшой частоты резонанса синфазный дроссель эффективнее подавляет помехи в нижней части частотного диапазона, в то время как конденсатор – в верхней части. Следовательно, для использования в ступени фильтрации синфазных помех необходимо выбирать конденсаторы с минимальной собственной паразитной индуктивностью и минимизировать паразитную индуктивность соединения конденсатора с системой заземления.

Если по результатам испытаний выявлена необходимость включения в фильтр ступени фильтрации дифференциальной помехи, то по аналогии с фильтром синфазных помех начинают с выбора топологии фильтра. Импеданс «приемника шума» представлен теми же двумя 50-Ом плечами эквивалента сети, но включенными для дифференциальной помехи последовательно. Таким образом, дифференциальный импеданс «приемника шума» составляет около 100 Ом. Импеданс же «источника шума» в этом случае имеет как высокоомный, так и низкоомный компонент, поэтому для дифференциальных помех часто рекомендуют топологию фильтра П-типа.

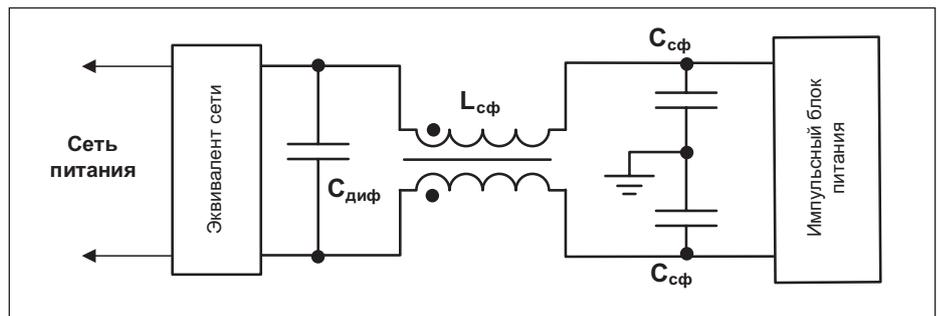


Рис. 10. Упрощенная схема комбинированного фильтра синфазных и дифференциальных помех

В качестве индуктивности дифференциального фильтра может применяться индуктивность утечки синфазного дросселя, а два конденсатора «линия питания – земля» в отдельных случаях могут заменить конденсатор дифференциального фильтра. Таким образом, в простейшем варианте П-фильтр дифференциальной помехи может быть образован добавлением еще одного конденсатора с противоположной стороны от синфазного дросселя, как показано на рис. 10. Если индуктивности утечки синфазного дросселя недостаточно, то в плечи фильтра устанавливаются дополнительные катушки.

Таким образом, фактически сетевой фильтр не состоит из двух изолированно действующих ступеней, подавляющих отдельно синфазную и дифференциальную помехи. Разделение на ступени условно и предназначено для упрощения анализа эквивалентных схем при протекании шумовых токов обоих видов. Поскольку элементы фильтра всегда работают совместно, степень подавления синфазных помех может оказывать значимое влияние на дифференциальную помеху.

Выводы

В настоящей статье приведено обобщенное описание процесса обеспечения ЭМС при разработке импульсных источников питания. Фильтрация помех в этом процессе занимает лишь второе место, так как является «последним рубежом» на пути помехи в сеть питания. Борьба с помехами в их источнике – наиболее эффективный подход, использование которого свидетельствует о высокой квалификации разработчика. Такой подход обеспечивает необходимый уровень кондуктивных помех оптимальным образом, что особенно важно при жестких ограничениях по массогабаритным показателям разрабатываемого устройства. ■

Подробнее изучить вопросы обеспечения электромагнитной совместимости, качества питания и сохранения формы сигналов в электронных системах можно в ходе тематических семинаров и вебинаров ООО «КРЭЛС» (<https://crels.ru/course>).

Литература

1. Mark J. Nave. Prediction of Conducted Emissions in Switched Mode Power Supplies. 1986 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. San Diego. USA.
2. Marty Brown. Power Supply Cookbook, Second Edition. Newnes publishing. 2001.
3. Keith Billings, Taylor Morey. Switch-mode Power Supply Handbook, Third Edition. McGraw Hill Inc. 2011.
4. Mahinda Vilathgamuva et al. EMI Suppression with Switching Frequency Modulated DC-DC Converters. IEEE Industry Application Magazine. November / December. 1999.
5. Sanjaya Maniktala. Switching Power Supplies A-Z, Second Edition. Newnes publishing. 2012.
6. Mark J. Nave. A Novel Differential Mode Rejection Network for Conducted Emissions Diagnostics. National Symposium on Electromagnetic Compatibility. Denver. USA. 1989.