

СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ ШУМОВ ИМПУЛЬСНЫХ СТАБИЛИЗАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

REDUCING NOISE GENERATED BY SWITCHING REGULATORS

В статье рассматриваются некоторые типы шумов импульсных DC/DC-преобразователей и способы борьбы с ними.

Abstract – This article will introduce different types of noise in switched-mode power supplies and present solutions to reduce the generation of noise.

В. Котигорошко

V. Kotigoroshko

В процессе работы импульсных источников питания (Switch-Mode Power Supply – SMPS) генерируются шумы, оказывающие неблагоприятное воздействие на разнообразное электронное оборудование, для которого они, собственно, являются помехами. В дальнейшем под термином помеха подразумевается любой сигнал или воздействие электромагнитного происхождения, которые могут оказать неблагоприятное влияние на работу устройства [1-6]. В подавляющем большинстве случаев уровень помех должен быть ограничен в соответствии с рекомендациями соответствующих международных и региональных стандартов, регламентирующих допустимые уровни электромагнитных помех. Источником помех могут быть различные устройства. Одни из них (например, импульсные источники питания и пр.) порождают помехи в сравнительно узком диапазоне частот, другие (сварочные аппараты и пр.) – в более широком. Помехи, которые распространяются по проводным линиям получили название кондуктивные помехи. Кондуктивная связь возникает, когда канал между источником помех и приемным устройством сформирован вследствие непосредственного контакта, который может быть реализован через линию передачи, провод, кабель, проводник печатной платы или металлический корпус [1]. В противоположность им излучаемые помехи распространяются через электромагнитное поле.

В статье рассматриваются некоторые виды шумов, которые генерируются импульсными источниками питания, а также способы борьбы с ними. Возможные варианты их распространения к объекту воздействия (т.е. приемнику помех) не анализируются. Тезис очень простой – нет шумов в источнике значит нет помех и в приемнике.

Хотя обсуждаемые проблемы в общем случае применимы ко всем SMPS-источникам питания, ос-

новное внимание в статье уделяется неизолированным DC/DC-преобразователям типа POL (Point of Load) или POU (Point of Use), которые широко используются для электропитания низковольтных устройств разного назначения.

DSP, CPU, ASIC и другие устройства отличаются наличием нескольких низковольтных цепей питания (0.85, 1.0, 1.2, 1.5, 1.8, 2.5, 2.8, 3.0, 3.3 В). Поэтому в современных сложных электронных приборах возникает проблема распределения больших токов по многочисленным низковольтным цепям. Для того, чтобы снизить потери мощности, эффективнее использовать возможности процессоров, а также наиболее оптимально решать проблемы отвода тепла, низковольтные источники питания размещают как можно ближе к нагрузке. Это, как правило, реализуется с использованием импульсных неизолированных DC/DC-преобразователей, размещаемых в непосредственной близости от конкретного оконечного устройства (рис. 1).

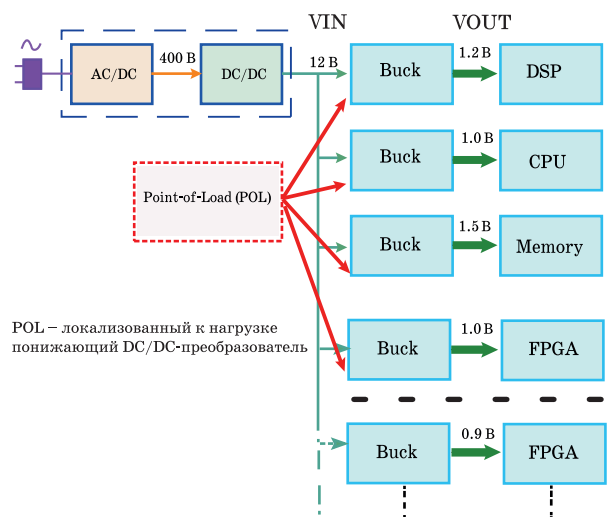


Рис. 1. Структура локализованных к нагрузке источников питания

Современные импульсные DC/DC-преобразователи обеспечивают широкий диапазон выходных напряжений и токов, формируемых из стандартных входных напряжений 3.3/5/9/12/24/48/64 В. При этом их КПД может превышать 96...98%, а выходное напряжение составляет 0.8...2.5 В.

Импульсные источники генерируют разные помехи. В процессе их работы происходит коммутация больших токов на протяжении очень коротких интервалов времени. Поскольку принцип работы импульсных DC/DC-преобразователей нельзя изменить, существуют способы, позволяющие, во-первых, уменьшить генерируемые помехи (шумы), а, во-вторых, отфильтровать их.

Основные виды и источники помех импульсных DC/DC-преобразователей:

- помехи, связанные с коммутацией переключающих элементов на рабочей (основной) частоте преобразователя
- высокочастотные помехи, вызванные большой скоростью нарастания тока в переключающих элементах, а также наличием паразитных индуктивностей
- помехи, обусловленные переходными процессами в переключающих элементах (звон)
- помехи на частоте биений и помехи во входных цепях преобразователя.

В импульсных DC/DC-преобразователях частота следования импульсных помех кратна рабочей частоте преобразователя, которая, как правило, составляет сотни килогерц или единицы мегагерц. Помехи, связанные с переходными процессами, накладываются на шумы, обусловленные рабочей частотой преобразователя. При подавлении помех наибольшую проблему представляют помехи, связанные с высокой скоростью нарастания тока, которые, в свою очередь, вызывают переходные процессы в сопутствующих паразитных цепях преобразователя. Такого рода помехи передаются как непосредственно по проводным цепям, так и через паразитные индуктивности и емкости. В изолированных DC/DC-преобразователях шумы проявляются в меньшей степени, чем в неизолированных. Наиболее актуально проблема генерируемых помех проявляется при использовании источников питания типа POL, что объясняется большими токами потребления микропроцессорных модулей (до нескольких десятков ампер при напряжении питания всего 0.9...1.5 В). Еще один источник помех связан со скачкообразным изменением тока нагрузки, что, соответственно, вызывает скачкообразное измене-

ние выходного напряжения. Конечно, система регулирования сглаживает эти выбросы, но наличие задержки в цепи обратной связи приводит к тому, что на выходе источника питания можно наблюдать затухающие импульсы. Микропроцессоры и другие высокочастотные устройства очень чувствительны к таким выбросам выходного напряжения.

Помехи, связанные с переключением элементов импульсного преобразователя на основной частоте, преобладают в суммарном спектре выходных шумов. Как правило, диапазон рабочих частот неизолированных DC/DC-преобразователей составляет примерно 0.5...3 МГц. Т.к. частота этого типа помех точно известна, их можно эффективно отфильтровать благодаря использованию LC-фильтров или линейных стабилизаторов напряжения (рис. 2).

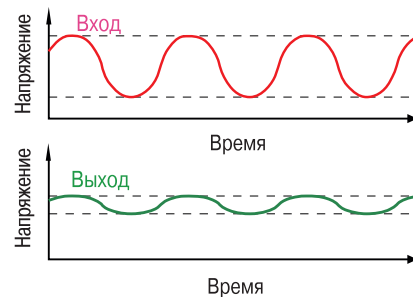


Рис. 2. Пример фильтрации помех на выходе DC/DC-преобразователя

Для выбора типа импульсного или линейного стабилизатора, а также параметров фильтра можно использовать специальное программное обеспечение, предоставляемое ведущими производителями DC/DC-преобразователей. Например, на web-сайте компании Analog Devices в свободном доступе имеются утилиты: ADIsimPower Voltage Regulator Design Tool и ADIsimPE. Использование утилиты ADIsimPower позволяет выполнить расчет импульсного DC/DC-преобразователя по заданным параметрам. В результате расчета предлагается принципиальная схема с номинальными значениями и типами используемых компонентов. Программа ADIsimPE используется для моделирования электронных устройств. ADIsimPE создана на основе симуляторов SIMetrix и SIMPLIS. Для моделирования линейных цепей, таких как прецизионные источники опорного напряжения, операционные усилители и линейные регуляторы напряжения, используется полноценный SPICE-симулятор SIMetrix. Приложение SIMPLIS (SIMulation for Piecewise Linear System) ориентировано на быстрое моделирование источников питания и импульсных стабилизаторов, а так-

же исследования ключевых схем преобразователей напряжения.

Высокочастотные помехи, обусловленные коммутационными процессами, вызывают наибольшие проблемы. Величина этих помех определяется паразитными индуктивностями, а также длительностью фронта переключения и величиной коммутируемого тока. Соединительные проводники, контактные площадки для пайки на печатной плате, выводы микросхем, переключки, соединительные проводники и другие компоненты, расположенные на печатной плате, можно рассматривать как паразитные индуктивности.

В общем случае можно считать, что проводник на печатной плате длиной один дюйм имеет паразитную индуктивность примерно 20 нГн. Для современных DC/DC-преобразователей время нарастания фронта тока примерно 30 нс (рис. 3). В этом случае при коммутации тока величиной 5 А и длине проводника всего один дюйм напряжение помехи равно 3.3 В ($V = L di/dt$).

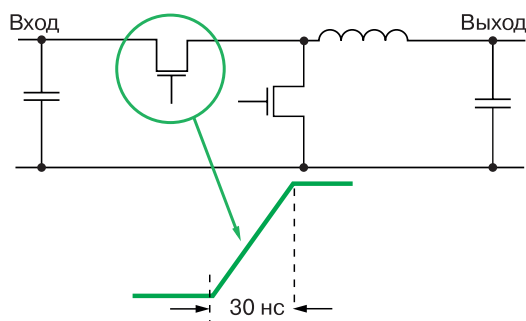


Рис. 3. Упрощенная структура понижающего DC/DC-преобразователя

Из приведенной формулы следует, что ключом к уменьшению этого рода помех является минимизация паразитной индуктивности. Величина тока не может быть уменьшена, т. к. для работы конкретной оконечной нагрузки требуется вполне определенный ток. Увеличение времени нарастания тока также малоэффективно, т. к. это повлечет за собой увеличение потерь при коммутации ключевых транзисторов и, соответственно, снижение КПД. Вместе с тем при уменьшении времени нарастания появляется возможность увеличить частоту переключения (преобразования) и тем самым снизить габаритные размеры катушек индуктивности и конденсаторов.

В современных DC/DC-преобразователях обычно используются или уже традиционные быстродействующие КМОП-транзисторы, или карбид-

кремниевые (SiC MOSFET) и нитрид-галлиевые (GaN MOSFET) полевые транзисторы. Их отличительная особенность – высокое быстродействие (время нарастания тока составляет всего несколько наносекунд) и большие значения допустимых выходных токов, что гарантирует высокий КПД (более 98%).

Транзисторы на основе нитрида галлия постепенно вытесняют с рынка традиционные силовые MOSFET-транзисторы. Их меньшее по сравнению с MOSFET-транзисторами сопротивление ($R_{си}$) в режиме насыщения позволяет повысить мощность и КПД DC/DC-преобразователей, а меньший заряд затвора – увеличить частоту переключения. КПД преобразователей, созданных с использованием eGaN-транзисторов, может достигать 98-99%, при этом транзисторы могут работать при температуре до 150 °С. Кроме того, миниатюрные размеры гарантируют их применение в разнообразных портативных устройствах. Параметры некоторых eGaN-транзисторов компании EPC приведены в табл. 1, 2.

Еще не так давно в устаревших моделях DC/DC-преобразователей использовались биполярные транзисторы, которые характеризовались временем нарастания около 100 нс и сравнительно небольшим выходным током. Учитывая тенденции развития POL-преобразователей, которые заключаются в дальнейшем увеличении выходного тока и уменьшении напряжения, единственный способ снижения такого рода помех – минимизация паразитных индуктивностей.

На рис. 4 показаны пути прохождения тока в импульсном понижающем (buck) стабилизаторе напряжения при коммутации ключевых транзисторов.

Таким образом, в течение одного такта работы (а это может быть всего десятки или сотни наносекунд) ток через транзисторы изменяется по сложному закону, описать который для конкретного случая весьма непросто. Существуют области монтажной или печатной платы преобразователя, в которых длина печатных проводников должна стремиться к нулю. Это единственный способ снизить паразитную индуктивность (L) и, соответственно, уровень помех. Кроме того, входной конденсатор необходимо устанавливать как можно ближе к силовому ключевому транзистору и общему проводнику управляющего ШИМ-контроллера.

На рис. 5 приведен вариант рекомендованного пути обратного тока в случае его протекания по проводнику с нулевым потенциалом (по сути, по заземляющей шине). Из рисунка следует, что необходимо

Таблица 1. Параметры некоторых eGaN-транзисторов

Тип	$U_{си}$, В	$R_{си}$ (макс.), МОм, ($U_{зи} = 5$ В)	$Q_э$, нК	$Q_{зи}$, нК	$Q_{зс}$, нК	Q_{RR} , нК	I_c , А	Размеры LGA-корпуса, мм
EPC2023	30	1.3	20	5.8	1.9	0	60	6.1×2.3
EPC2020	60	2.0	16	5.00	2.0		60	6.1×2.3
EPC2031		2.6	17.0	5.20	3.20		31	4.6×2.6
EPC2035		45	0.88	0.3	0.2		1	0.9×0.9
EPC2021	80	2.5	15.0	3.8	2.1		60	6.1×2.3
EPC2029		3.2	13.0	4.0	2.5		31	4.6×2.6
EPC2034	200	10	8.5	2.6	1.4		31	4.6×2.6
EPC2010C		25	3.7	1.3	0.7		22	3.6×1.6
EPC2025	300	150	1.9	0.61	0.3		4	1.95×1.95
EPC2027	450	400	1.7	0.60	0.25			

Таблица 2. Параметры eGaN-транзисторов (сборки EPC2107/08)

Тип	$U_{си}$, В	$R_{си}$ (макс.), МОм, ($U_{зи} = 5$ В)	$Q_э$, нК	$Q_{зи}$, нК	$Q_{зс}$, нК	Q_{RR} , нК	I_c , А	Размеры LGA-корпуса, мм
EPC2107	100	320	0.16	0.065	0.04	0	1.7	1.35×1.35
EPC2108	60	190	0.22	0.085	0.045			

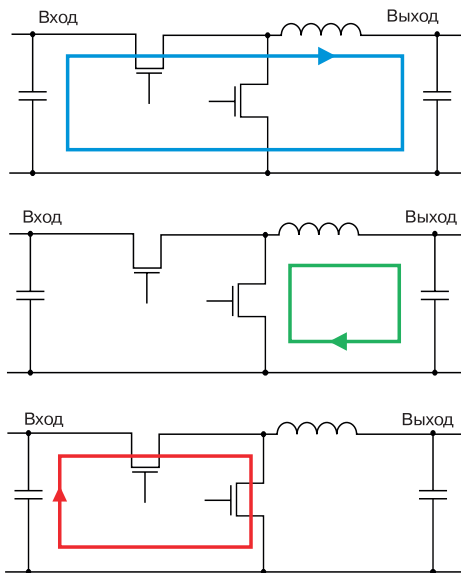


Рис. 4. Пути протекания импульсных токов в понижающем преобразователе

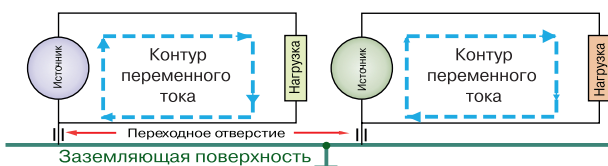


Рис. 5. Варианты размещения межслойных соединительных отверстий

локализовать путь обратного тока и по возможности предотвращать его распространение по общим с другими устройствами цепям заземляющей поверхности. Т. к. при больших выходных токах преобразователя падение напряжения на локальных участках проводящей поверхности может чрезмерно возрастать. Кроме того, на пути вероятного распространения импульсного обратного тока на печатной плате не следует размещать переходные отверстия, используемые для межслойного соединения шин заземления, т. к. они являются дополнительными источниками паразитной индуктивности. Такие межслойные соединительные отверстия рекомендуется размещать в одном месте, как показано на рис. 5. Пренебрежение этими рекомендациями может привести к существенному увеличению уровня помех. Генерируемые импульсным преобразователем высокочастотные помехи располагаются в диапазоне частот 10...300 МГц, что, как правило, намного выше, нежели рабочая частота переключения ключевых транзисторов регулятора.

Стандартный LC-фильтр, который обычно используется для уменьшения уровня пульсаций выходного напряжения и ослабления помех на выходе источника питания, может оказаться непригодным, т. к. стандартные LC-фильтры на этих частотах практически бесполезны. Для подавления высокоча-

стотных помех используются т. н. ферритовые фильтры. Ферритовое кольцо (бусинка) увеличивает индуктивность проходящего через него участка проводника во много раз, что позволяет более эффективно подавлять высокочастотные помехи.

Помехи в виде затухающих колебаний (т. н. звон), возникающие в коммутируемых цепях, приведены на рис. 6. Основная причина звона – нелинейные переходные процессы, обусловленные наличием паразитных емкостей и индуктивностей. Для борьбы со звоном применяются пассивные демпферы.

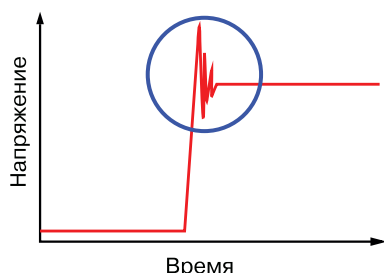


Рис. 6. Затухающие колебания, возникающие в коммутируемых цепях

Снизить амплитуду импульсов перенапряжения (которые также могут быть причиной пробоя транзисторов) можно за счет оптимизации управления ключевыми транзисторами, например, реализовав их плавное выключение. Другие способы – это уменьшение скорости нарастания напряжения dV/dt , достигаемое применением снабберов, или простое ограничение амплитуды, для чего применяются варисторы или полупроводниковые компоненты. Снабберы представляют собой в самом простейшем случае конденсатор или обычную RC-цепь, а также другие варианты электронных пассивных цепей (например, резистор-конденсатор-диод), позволяющие уменьшить выбросы напряжения. Принцип действия снаббера заключается в снижении скорости нарастания напряжения (dV/dt) и, тем самым, уменьшении амплитуды выброса напряжения.

В пассивных демпферах поглощаемая энергия затухающих колебаний рассеивается в виде тепла в резистивной нагрузке, что снижает эффективность преобразователей. В ряде случаев в простых неизолированных DC/DC-преобразователях небольшой мощности пассивные демпферы не используются. В мощных преобразователях рекомендуется использовать демпферные цепи, обеспечивающие рекуперацию энергии обратно в источник энергоснабжения преобразователя. В изолированных DC/DC-преобразователях с трансформаторной развязкой для снижения этого вида помех пассив-

ные демпферы часто устанавливаются как в первичной, так и во вторичной цепи трансформатора.

В маломощных DC/DC-преобразователях постоянного тока зачастую применяется т. н. режим разрывных токов (Discontinuous Current Mode – DCM). В этом режиме в каждом такте ток через катушку индуктивности снижается до нуля. Преимущества таких преобразователей – сравнительно простая структура и небольшая стоимость. Недостатки заключаются в том, что при увеличении выходной мощности возрастает коммутируемый ток и, соответственно, уровень помех и, кроме того, снижается КПД. На рис. 7 приведен примерный вид колебательного процесса на выходе ключевого транзистора в асинхронных понижающих преобразователях, работающих в режиме разрывных токов. В схеме в качестве разрядного диода используется диод Шоттки.

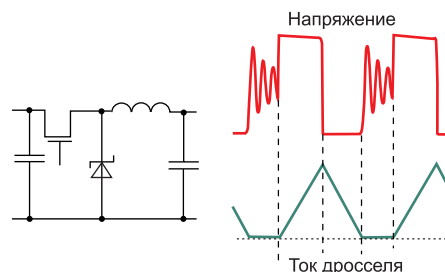


Рис. 7. Помехи в DC/DC-преобразователе, работающим в режиме разрывных токов

Переходной процесс можно отчетливо наблюдать на временном интервале, когда ток через индуктивность равен нулю, а транзистор находится в выключенном состоянии. Колебательный контур образован в данном случае паразитными емкостями (проводников п. п., транзисторного ключа и пр.) и индуктивностью катушки. Чтобы снизить амплитуду выбросов, следует уменьшить добротность колебательной системы. Например, увеличить потери в катушке индуктивности, намотав ее более тонким проводом или установив последовательно (параллельно) с катушкой резистор.

В общем случае для минимизации уровня помех в импульсном преобразователе не рекомендуется использовать режим разрывных токов. При одинаковой выходной мощности в режиме DCM коммутируются более высокие импульсные токи по сравнению с режимом неразрывного тока дросселя (Continuous Current Mode – CCM), что может стать причиной нежелательных помех.

В сложных электронных системах с большим количеством распределенных источников питания ис-

пользуется несколько DC/DC-преобразователей с разными выходными напряжениями. Как правило, если они не синхронизированы по частоте, в результате наложения шумов не исключена вероятность появления низкочастотных помех с частотой биений. На рис. 8 приведена структура независимых понижающих DC/DC-преобразователей с разными выходными напряжениями [2]. В силу многих причин и с очень большой вероятностью их рабочие частоты будут отличаться, что может вызвать появление низкочастотных помех, обусловленных наложением процессов с близкими частотами. Причем, это могут быть помехи и в звуковом диапазоне частот, вызывающие гул, сопровождающий работу преобразователя. Фильтровать помехи этого типа достаточно сложно. Наиболее эффективный метод борьбы с биениями – синхронизация всех одновременно работающих в системе электропитания DC/DC-преобразователей.

В качестве примера можно рекомендовать микросхему ADP5135 (Analog Devices), в которой объ-

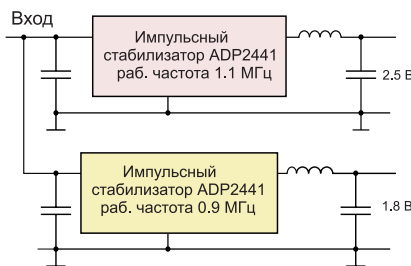


Рис. 8. Фрагмент структуры системы распределенного электропитания

единены три понижающих (BUCK1, BUCK2, BUCK3) DC/DC-преобразователя с независимыми выходами и регулируемым выходным напряжением (0.8...3.8 В).

В этой ИМС синхронизация по частоте и фазовый сдвиг сигналов запуска отдельных преобразователей осуществляются в автоматическом режиме. Микросхемы изготавливаются в корпусе типа 24-LFCSP размерами 4×4 мм. Отклонение выходного напряжения не более ±1.8%, частота преобразования 3 МГц (рис. 9) [4].

Часто разработчики, сталкиваясь с проблемой помех, интуитивно начинают бороться с ними на выходе преобразователя, принимая во внимание, в первую очередь, то, что чувствительная к помехам нагрузка подключается к выходу преобразователя. Однако в действительности на выходе импульсного понижающего преобразователя уровень помех может быть меньше, чем на его входе (рис. 10). Объясняется это тем, что в этом типе преобразовате-

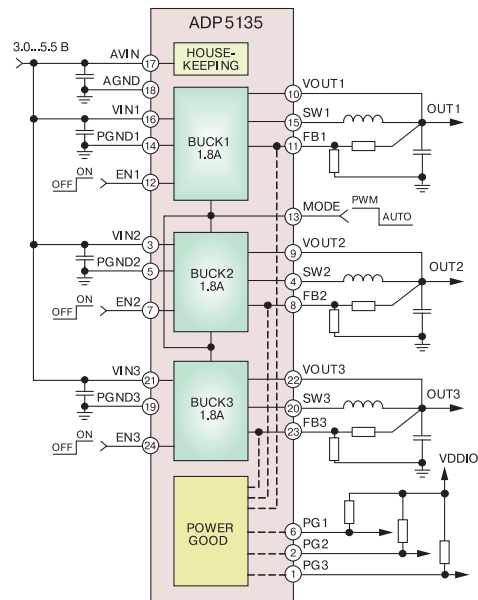


Рис. 9. Структура локализованных к нагрузке источников питания на базе ИМС ADP5135

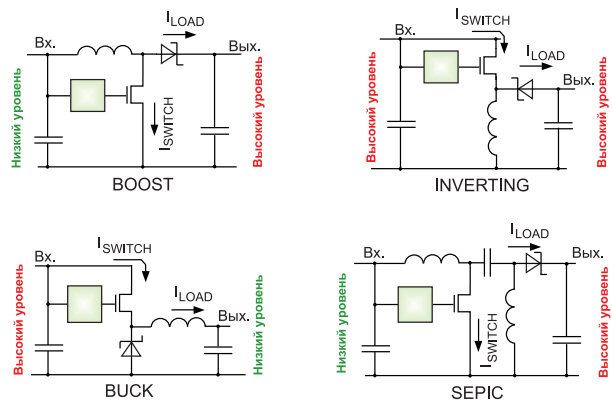


Рис. 10. Сравнительный уровень помех импульсных преобразователей

лей последовательно подключенная к выходу катушка индуктивности играет роль фильтра. Ток через катушку индуктивности нарастает линейно на интервале включения и снижается на интервале отключения коммутируемого транзистора. Максимальный ток, протекающий по входным цепям этого типа преобразователей, наблюдается именно при включении ключа. В течение времени, когда транзистор отключен, ток во входной цепи отсутствует. Таким образом, входную цепь понижающего DC/DC-преобразователя можно рассматривать как источник импульсных помех, обусловленных импульсным током. Наличие входного конденсатора помогает в какой-то мере усреднить входной ток и сгладить пульсации, но он не в состоянии полностью отфильтровать импульсные помехи. Поэтому разработчики должны принимать во внимание тот факт,

что очень часто в системах с понижающими импульсными стабилизаторами вероятный источник помех – это входные цепи. Поэтому длина входных проводников должна быть минимальной и, кроме того, следует оптимизировать трассировку проводников, а фильтрующий входной конденсатор следует располагать в непосредственной близости от потребляющей ток цепи.

Наряду с преимуществами импульсные устройства обработки сигналов обладают рядом недостатков. Среди которых наиболее серьезный – генерация электрических и акустических помех во время переходных процессов, вызванных коммутацией больших токов. Во многих случаях к импульсным источникам питания предъявляются достаточно жесткие требования к шумам выходного напряжения (например, в радиолокации). Использование линейных стабилизаторов в мобильной аппаратуре ограничивается в связи с их большой массой и габаритными размерами. Вместе с тем при использовании импульсных стабилизаторов применение устройств борьбы с помехами (стабилизация, фильтрация, экранирование и пр.), в свою очередь, также ухудшает массогабаритные показатели изделий.

Перспективный способ снижения помех – это использование технологии расширения спектра (Spread Spectrum), что позволяет снизить уровень гармонических составляющих помех, генерируемых DC/DC-преобразователями. А это позволяет расширить сферу их применения. В последнее время ведущие производители активно продвигают на рынок DC/DC-преобразователи с использованием этой технологии.

Технология не нова. Она успешно используется в технике связи, в том числе в системах военной, космической и мобильной связи. Известно, что существенно увеличить помехоустойчивость и, соответственно, достоверность передаваемых сообщений можно за счет введения избыточности при кодировании данных, применения сложных видов модуляции передаваемого сигнала и др. Для реализации этого существует несколько методов, причем применение любого из них всегда приводит к расширению (размытию) спектра передаваемого сигнала. При использовании этих способов удастся восстановить сообщение даже при уровне зашумленности канала связи более, чем полезный уровень сигнала. Расширение спектра передаваемого сигнала в системах связи не самоцель, а плата за увеличение помехоустойчивости. Если основная доля энергии сигнала сосредоточена в сравнительно узкой поло-

се частот, то создаваемые любыми источниками помехи, попадающие в полосу частот сигнала, могут полностью "маскировать" полезный сигнал, что, в конечном счете, приведет к полной потере связи. Один из способов повышения эффективности передачи информации с помощью модулированных сигналов через канал с искажениями (помехами) – расширение спектра сигнала.

В выходном напряжении импульсных DC/DC-преобразователей, кроме полезной постоянной составляющей, всегда присутствуют импульсы напряжения с частотой кратной частоте коммутации ключевых транзисторов. В случае применения технологии Spread Spectrum в импульсных DC/DC-преобразователях полезный эффект заключается именно в размытии спектра и снижении уровня спектральных составляющих. Самый простой метод для реализации технологии Spread Spectrum в импульсных преобразователях заключается в частотной модуляции сигнала управления выходными ключами. В этом случае, как и при любой модуляции, происходит рассредоточение энергии гармонических составляющих шумов в более широкой полосе частот, что, соответственно, снижает спектральную плотность мощности в любой точке спектра. Это, в свою очередь, позволяет снизить уровень спектральных составляющих помех ниже допустимого уровня, рекомендуемого в соответствующих стандартах (FCC, EN 55022/CISPR22, EN 55025/CISPR25 и др.).

Например, в стандарте Международного специального комитета по борьбе с радиопомехами CISPR25 (International Special Committee on Radio Interference) приведены рекомендованные уровни помех, генерируемые оборудованием автотранспортных средств в диапазоне частот станций радиовещания с амплитудной модуляцией. Условное обозначение диапазонов частот приведено ниже:

- длинные волны (LW) – 0.15...0.3 МГц
- средние волны (MW) – 0.53...1.8 МГц
- короткие волны (SW) – 5.9... 6.2 МГц
- гражданский диапазон (CB) – 26...28 МГц.

В качестве приемников, подлежащих защите от помех, можно отметить вещательные приемники (аудио и телевизионные), наземные мобильные радиосистемы, радиотелефоны, любительские и гражданские радиосистемы, системы спутниковой навигации и пр.

ИМС LT8391 – синхронный понижающе-повышающий LED-драйвер, поддерживающий технологию Spread Spectrum. В ИМС LT8391 для расшире-

ния спектра используется технология SSFM (Spread Spectrum Frequency Modulation), обеспечивающая размытие спектра за счет частотной модуляции сигнала управления коммутируемыми ключами пилообразным напряжением. Девияция частоты сигнала управления составляет $\pm 15\%$. Напряжение питания 4...60 В, выходное напряжение до 60 В, КПД до 98%, диапазон рабочих температур $-40...150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (LT8391HUFDPBF), нестабильность выходного тока не более $\pm 3\%$, максимальная частота переключения 650 кГц. Благодаря этим и другим параметрам эта микросхема ориентирована на применение в качестве драйверов светодиодов в автотранспортных средствах.

В качестве примера ниже приведены результаты испытаний ИМС LT8391 (Analog Devices/Linear Technology) на соответствие рекомендациям стандарта CISPR25. Средние и пиковые уровни кондуктивных помех в диапазоне частот 150... 2000 кГц приведены на рис. 11, в диапазоне частот 0.15...30 МГц – на рис. 12.

Как видно, использование технологии SSFM позволяет снизить средний и пиковый уровни кондуктивных помех до значений более низких, чем рекомендуются в стандарте CISPR25 (класс 5). Причем

степень подавления среднего уровня помех даже больше, чем пикового.

Дополнительную информацию о методах снижения помех импульсных преобразователей можно найти в [1-6].

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаренко В.В., Пилинский В.В. Анализ эффективности использования технологии Spread Spectrum для снижения уровня кондуктивных помех DC/DC-преобразователей. / Електротехнічні і комп'ютерні системи, випуск 24 (100) с. 98-104.

2. By Frederik Dostal, Analog Devices. Switched-mode power supplies generate noise (www.analog.com).

3. Point of load converters – The topologies, converters, and switching devices required for efficient conversion.

4. ADP5135. Triple 1800 mA buck regulator with precision enables and power-good outputs (www.analog.com).

5. Power Supply Noise Reduction (www.designers-guide.org/Design/).

6. An overview of conducted EMI specifications for power supplies.

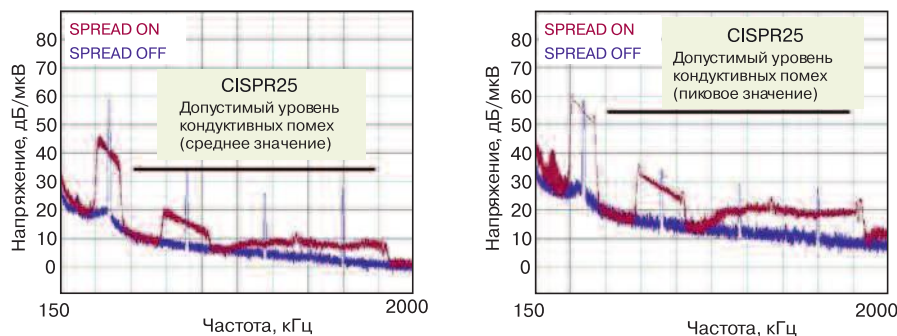


Рис. 11. Средние и пиковые уровни кондуктивных помех в диапазоне частот 150... 2000 кГц

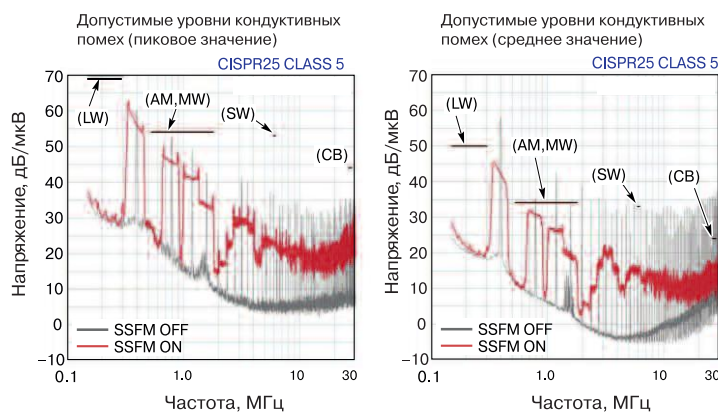


Рис. 12. Средние и пиковые уровни кондуктивных помех в диапазоне частот 0.15... 30 МГц