

Характеристики электромагнитных помех в системе электропитания и методы борьбы с ними

В статье описаны причины возникновения электромагнитных помех (EMI) в системе электропитания, приведен обзор их типов, а также рассмотрены варианты по организации электромагнитной совместимости системы электропитания, в основе которой находятся DC/DC-преобразователи SynQor.

Сергей Воробьев

vorobyev@ranet.ru

Введение

Проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) является одной из самых сложных, которая возникает при создании любого электронного оборудования. Практически любая современная электроника должна удовлетворять требованиям и стандартам по ЭМС на уровне системы либо изделия. При этом ключевой системой, которая зачастую влияет на всю ЭМС изделия, является система электропитания, состоящая, как правило, из модулей, функционирующих по импульсному принципу [1]. Импульсные AC/DC- и DC/DC-преобразователи по своей природе генерируют значительные уровни кондуктивных (conducted EMI) и излучаемых (radiated EMI) помех и шумов. И если эти шумы не будут подавлены и отфильтрованы максимально близко к их источнику, они могут сказаться на всем изделии в целом, значительно увеличив сложность решения проблемы ЭМС. В связи с этим рекомендуется устанавливать локальный EMI-фильтр для каждого модуля питания.

В свою очередь, уровень электромагнитных помех в системе сказывается на взаимодействии всех электронных систем друг с другом, и, как правило, это негативное влияние.

Первым шагом в решении проблемы ЭМС для системы электропитания является глубокое понимание требований, которые относятся к системе в целом. Фактически, сейчас нет каких-то универсальных либо регламентирующих требований по ЭМС, которые относятся непосредственно к модулям электропитания. Обычно требования касают-

ся конечного оборудования, которые определяются его типом [1]. В связи с этим многие производители модулей и систем электропитания для улучшения ценовой политики не включают в состав своих изделий полноценные сертифицированные EMI-фильтры, вынося их в отдельную линейку изделий [2]. Подразумевается, что разрабатываемые изделия могут иметь различные требования по ЭМС, и разработчики смогут самостоятельно внести некоторые небольшие дополнения во внешнюю фильтрующую цепь для адаптации разрабатываемого конечного оборудования под определенные требования, тем самым уменьшая стоимость конечного изделия. Однако при этом необходимо четко понимать природу возникновения помех и способы борьбы с ними.

Природа возникновения и классификация электромагнитных помех

Электронное оборудование какого-либо устройства или прибора непосредственно взаимодействует с модулем питания. Именно в связи с этим проблему ЭМС необходимо рассматривать максимально тщательно.

Природа электромагнитных помех подразумевает их распространение как по проводникам (кондуктивные помехи), так и через окружающее пространство и непроводящие среды (индуктивные, излучаемые помехи).

Рассмотрим более подробно каждый тип помех и их роль и влияние в модулях и системе электропитания.

Кондуктивные помехи

Для того чтобы лучше понять природу возникновения кондуктивных помех, их, как правило, классифицируют как дифференциальные (differential mode или normal mode — симметричные, противофазные) и синфазные (common mode — несимметричные, общего вида) (рис. 1).

Дифференциальные помехи возникают на линии электропитания и не связаны с заземлением, их еще называют помехи «провод-провод». В данном случае действующее напряжение помехи приложено между двумя проводниками цепи, например между выводами (положительным и отрицательным) цепи выходной цепи V_{out} [3].

Синфазные же помехи возникают и изменяются между одним из проводников и заземляющим слоем печатной платы. Их также еще называют помехи «провод-земля».

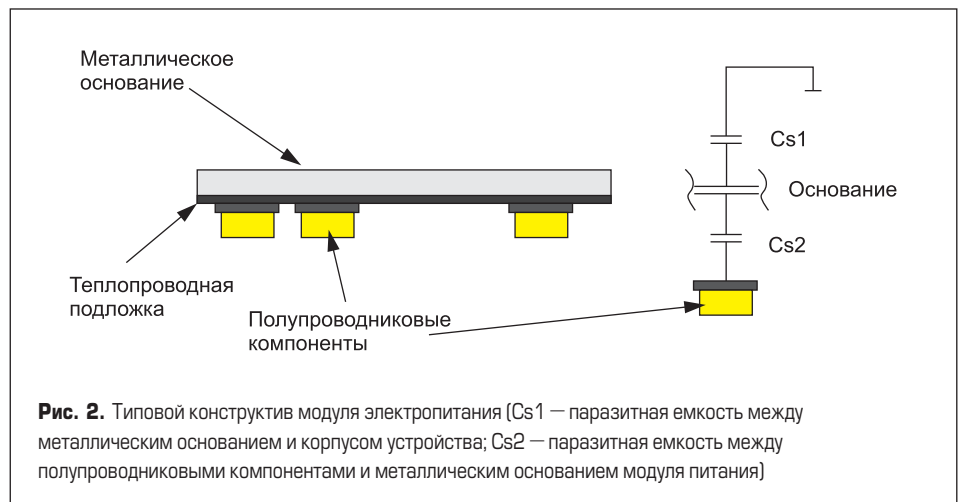
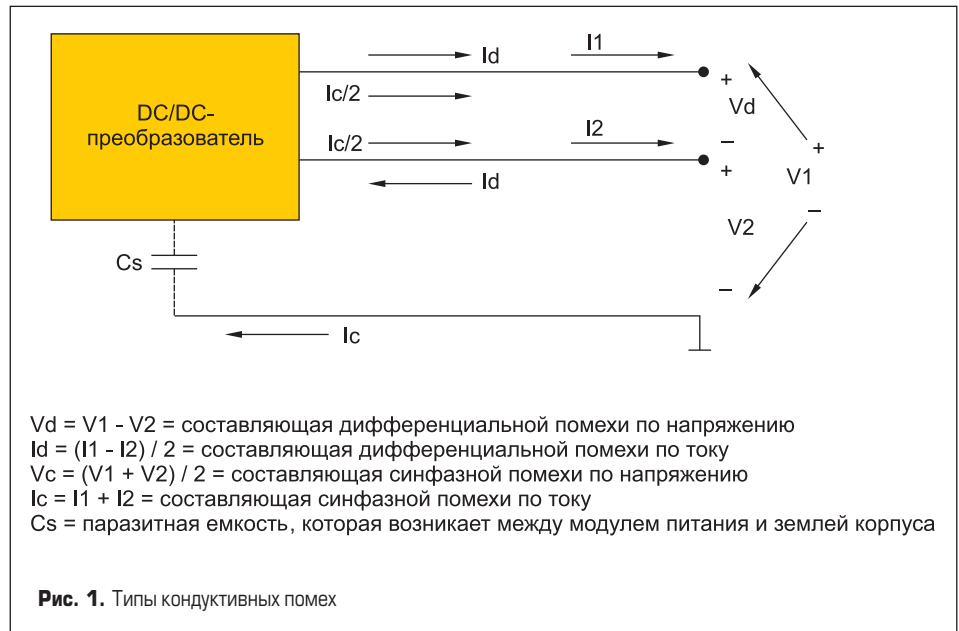
С целью минимизации дифференциальных помех и уменьшения шума, исходящего от DC/DC-преобразователей, многие производители модулей и систем электропитания добавляют в свой состав входной фильтр [1].

Однако исходящие от модуля питания синфазные помехи, в отличие от дифференциальных, не могут быть заранее определены, так как для этого необходимо знать размещение модуля и конструктив печатной платы. Уровень синфазных помех в большей степени связан с паразитной емкостью, которая возникает между модулем питания и землей корпуса. При этом конструктив модуля питания может значительно влиять на данный параметр. На рис. 2 изображен типовой конструктив модуля питания.

Для уменьшения влияния локального перегрева и отвода тепла от самых теплонагруженных компонентов (ключи, трансформатор и т. д.) в конструкцию вводится металлическое основание, а для минимизации теплового сопротивления модуля в его конструкцию вводится очень тонкая теплопроводная пленка/прокладка, которая разделяет полупроводниковые устройства и металлическое основание.

Подобный тип конструкции позволяет отвести значительную часть тепла от полупроводников, но в то же время приводит к появлению значительной паразитной емкости между полупроводниками и металлическим основанием.

$Cs1$ представляет собой паразитную емкость между металлическим основанием модуля питания и заземленным корпусом устройства. $Cs1$ имеет, как правило, очень малое значение и напрямую связана с размером металлического основания, близостью расположения к корпусу, а также размерами и формой корпуса. Во многих мощных модулях питания металлическое основание соединено напрямую с корпусом устройства, фактически этим самым емкость $Cs1$ замыкается накоротко. $Cs2$ — это паразитная емкость между полупроводниковыми

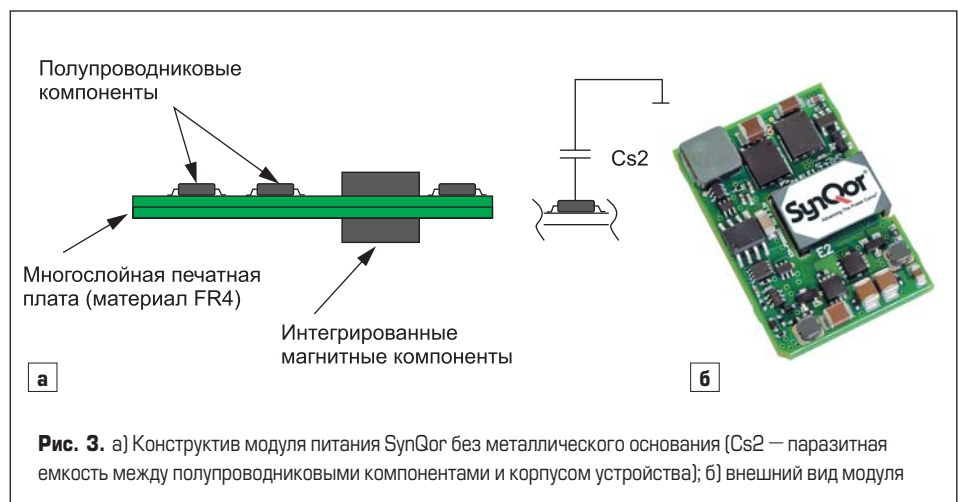


компонентами и металлическим основанием модуля питания.

Ряд ведущих производителей модулей и систем электропитания в конструкции своих модулей применяют различные решения, которые позволяют минимизировать уровень паразитных емкостей. Например, в линейке PowerQor компания SynQor (рис. 3) использует открытую конструкцию без какого-либо металлического основания, что значительно

снижает паразитную емкость между модулем и землей корпуса.

Таким образом, синфазные токи могут быть значительно уменьшены по сравнению со стандартной конструкцией модуля питания. А проблема локального перегрева частично решается за счет использования многослойной печатной платы со множеством металлизированных слоев для лучшего перераспределения тепла.



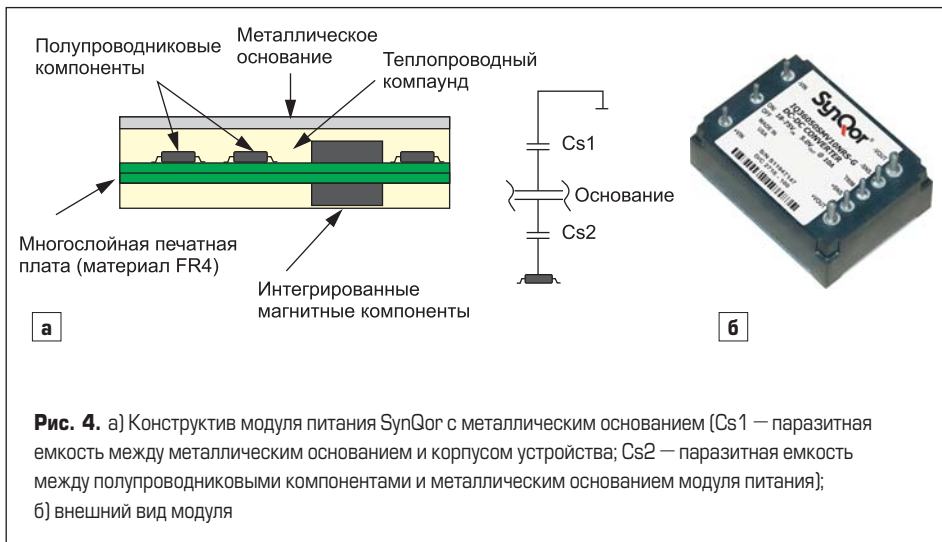


Рис. 4. а) Конструктив модуля питания SynQor с металлическим основанием (Cs1 — паразитная емкость между металлическим основанием и корпусом устройства; Cs2 — паразитная емкость между полупроводниковыми компонентами и металлическим основанием модуля питания); б) внешний вид модуля

На рис. 2 и 3 представлены лишь упрощенные схемы, которые влияют на возникновение кондуктивных помех. В то же время можно утверждать, что полупроводниковые приборы в сочетании с силовым трансформатором являются основными источниками синфазных помех [1].

Линейка модулей питания SynQor также включает корпусированные преобразователи в исполнении с металлическим основанием и фланцами для крепления, это актуально для достаточно мощных решений и аппаратуры повышенной надежности [2] (рис. 4).

Однако и в данном исполнении паразитная емкость Cs2 между полупроводниковыми компонентами и металлическим основанием модуля питания значительно меньше, по сравнению с типовыми решениями. Это обусловлено самой конструкцией модуля. Именно близость металлической «вкладки» полупроводниковых компонентов к основанию способствует увеличению взаимодействия (увеличению емкости Cs2); как итог — увеличение синфазных токов в традиционной компоновке модулей питания.

В модулях SynQor печатная плата с полупроводниковыми компонентами расположена на расстоянии, которое позволяет существенно уменьшить паразитную емкость Cs2, при этом свободные полости заполняются теплопроводным компаундом, что, в совокупности с развитыми металлизированными слоями печатной платы модуля, позволяет избежать локального перегрева и увеличить максимальную возможную рабочую температуру основания до +100...+125 °С [2].

Рассмотрим более подробно пример реализации внешнего фильтра, который позволяет уменьшить влияние паразитных емкостей на возникновение кондуктивных помех. При

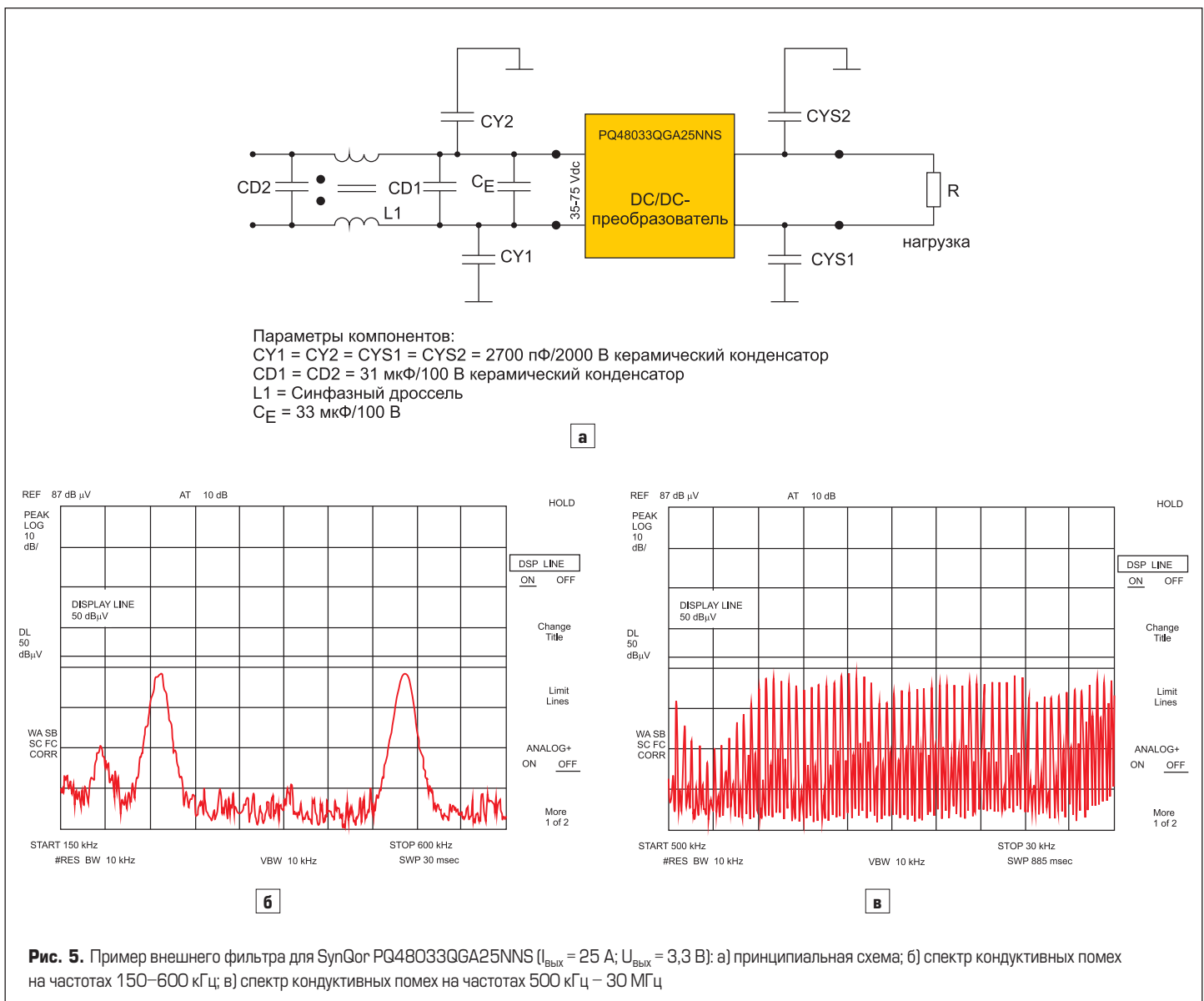


Рис. 5. Пример внешнего фильтра для SynQor PQ48033QGA25NNS ($I_{\text{Вых}} = 25 \text{ А}$; $U_{\text{Вых}} = 3,3 \text{ В}$): а) принципиальная схема; б) спектр кондуктивных помех на частотах 150–600 кГц; в) спектр кондуктивных помех на частотах 500 кГц – 30 МГц

проектировании внешнего фильтра следует обратить внимание на частоту преобразования модуля электропитания: если данная частота фиксированная, то спроектировать фильтр и спрогнозировать уровень электромагнитных помех значительно легче [2]. При этом важно отметить, что даже у модулей электропитания с фиксированной частотой есть дрейф по частоте $\pm 17\%$ в зависимости от температуры [1]. На рис. 5 изображен типовой фильтр для модуля питания SynQor PQ48033QGA25NNS.

Как было отмечено выше, для уменьшения стоимости конечного изделия в составе модулей питания присутствует фильтр по входу, но он, как правило, несертифицированный. Обычно это простой фильтр типа Pi, который состоит из двух керамических конденсаторов и индуктивности, включенной между ними. Основное его предназначение — уменьшение уровня дифференциальных помех, исходящих от источника, которые могут быть спрогнозированы производителем. Но обычно подобный фильтр не решает проблему полностью. Для более качественного устранения тока дифференциальных помех необходимо добавить керамический конденсатор на входную цепь (на схеме это CD1, 2). Для данной задачи может быть применен конденсатор X-типа, который предназначен для уменьшения влияния симметричной помехи.

В свою очередь, несимметричные токи от дифференциальной помехи распространяются одновременно по обоим проводам и затем по «земле». Такие пути трудно поддаются учету, и их трудно спрогнозировать, по этим причинам нормирование и подавление помех осуществляется по несимметричному пути [4]. Для данных целей в модуль фильтрации необходимо установить индуктивный элемент. В качестве подобного элемента зачастую используется синфазный дроссель (Common Mode Choke, СМС), на схеме — элемент L1 [5].

Синфазный дроссель состоит из двух обмоток (рис. 6а), которые намотаны на общий сердечник. В качестве сердечника используется феррит. Когда через обмотки протекают дифференциальные токи, магнитные поля, индуцированные этими токами, взаимно уничтожают друг друга [5]. Теоретически они не влияют на прохождение дифференциальных сигналов. В случае появления синфазных токов магнитные потоки обеих обмоток складываются, и входной импеданс увеличивается, что приводит к подавлению синфазных токов и значительному снижению амплитуды шумового сигнала. Синфазные дроссели для дифференциального сигнала работают как простой проводник, а для синфазного тока (шума) — как индуктивность. Таким образом, применение синфазного дросселя обеспечивает большой импеданс для синфазного тока и большую эффективность подавления синфазных шумов по сравнению с обычными индуктивностями [5].

Также для снижения асимметричных, синфазных помех в фильтр вводят так называемые Y-конденсаторы, включаемые между

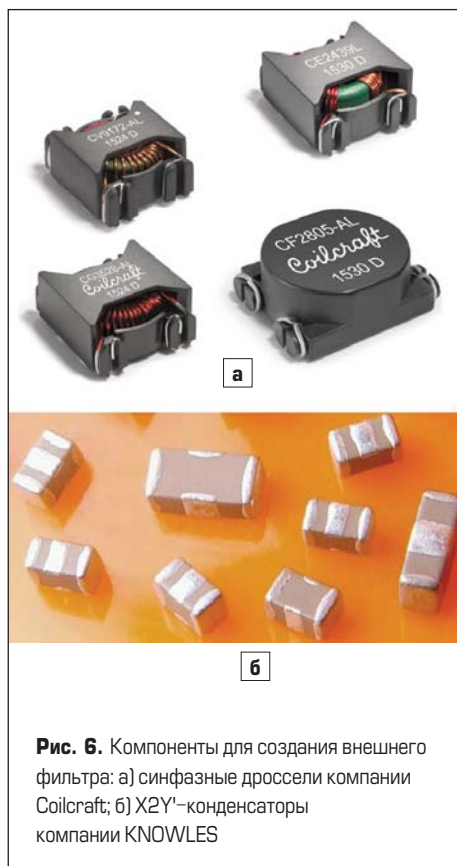


Рис. 6. Компоненты для создания внешнего фильтра: а) синфазные дроссели компании Coilcraft; б) X2Y-конденсаторы компании KNOWLES

силовым проводником и землей. На схеме это CY1, 2. Y-конденсатор является вариацией упомянутого выше X-конденсатора. Различие между X- и Y-конденсаторами заключается в том, что требования к надежности и выдерживаемым перенапряжениям у Y-конденсаторов более высокие (они могут выдерживать импульс напряжения до 8 кВ).

В качестве универсального решения ряд производителей предлагают конденсаторы типа X2Y, которые содержат три конденсатора (один X и два Y) в одном корпусе, в результате чего X2Y способен фильтровать как дифференциальную, так и синфазную составляющие кондуктивного шума (рис. 6б).

Электролитический конденсатор C_E на схеме является также очень важным элементом, который влияет на устойчивость системы электропитания (более подробно об этом написано в [5]).

Описанный фильтр является довольно типовым решением, однако даже подобное решение позволяет достичь достаточно приемлемого уровня. На рис. 5б и 5в представлен спектр кондуктивных помех для модуля питания SynQor PQ48033QGA25NNS при использовании данного фильтра. Этих результатов удалось достичь в первую очередь из-за того, что во всех модулях питания SynQor применена схемотехника с фиксированной частотой преобразования $\sim 250\text{--}400\text{ кГц}/550\text{--}650\text{ кГц}$, что существенно уменьшает сложность фильтра и облегчает расчет его компонентов.

Если требования по ЭМС более жесткие, то дальнейшее снижение радиопомех достигается установкой фильтров более высокого

порядка либо дополнительных отдельных модулей фильтрации; при этом очень важна трассировка печатной платы [4].

Индуктивные помехи

Индуктивные помехи, как и кондуктивные, являются важной проблемой. При этом, также важно помнить, что система в целом должна соответствовать стандартам. Индуктивные помехи и излучения имеют важное значение в диапазоне 30–1000 МГц [1]. Один из вариантов борьбы с индуктивными помехами в данном диапазоне частот — это применение металлического корпуса в дополнение к развитым слоям печатной платы, что обеспечивает значительное ослабление электромагнитных излучений в диапазоне частот, о котором идет речь.

Таким образом, большинство решений, которые имеют место при реализации стандартных систем питания, потенциально будут обеспечивать достаточное затухание и позволят системе соответствовать нормам и по индуктивным помехам. При этом использовать сертифицированный DC/DC-преобразователь является весьма неэкономичным и непрактичным решением.

Цельнометаллический корпус кажется наилучшим решением, это прекрасный барьер для излучаемого шума. Однако такой вариант влечет за собой увеличение массо-габаритных показателей изделия, что на практике крайне нежелательно. При таком подходе для уменьшения индуктивных помех важно минимизировать размер любого отверстия в корпусе и обеспечить электрический контакт со всеми металлическими частями корпуса.

Индуктивные помехи также можно разделить на дифференциальные и синфазные. По своей природе дифференциальные помехи исходят от замкнутых кольцевых антенн. Такие «антенные» помехи могут возникнуть на печатной плате источника питания в виде замкнутой токонесущей петли, а напряженность поля данной антенны пропорциональна току в данном контуре и квадрату частоты колебаний несущей частоты [1].

При уменьшении площади токовой петли можно легко свести к минимуму дифференциальный шум, исходящий от модуля питания. Данному факту было уделено большое внимание при проектировании всех модулей SynQor, и, соответственно, были сделаны все необходимые корректировки в разводке печатного модуля платы [2].

Синфазное же излучение, которое также присутствует в индуктивных помехах, труднее контролировать, так как оно обычно исходит от входных и выходных выводов модуля питания и, как правило, определяет общую картину индуктивных помех, исходящих от источника. Из-за их относительно большой длины входные и выходные сети являются хорошиими проводниками электромагнитных помех. Входные и выходные выводы ведут себя как линейные антенны, управляемые напряжением [1].

Таблица. Индуктивные излучения модуля PQ48033QGA25NNS при использовании внешнего фильтра, изображенного на рис. 5

Частота, МГц	Поляризация антенны	Измеренное значение напряженности электромагнитного поля, мкВ/м	Ограничение по CISPR Class B, мкВ/м	Разница, дБ	Тип измерения		
30,17	H	30,9	30,0	0,9	Peak		
30,66		29,7		-0,3			
36,20		37,1		7,1			
37,71		37,8		7,8			
48,76		28,7		-1,3			
52,03		31,2		1,2			
86,46		23,4		-6,6			
108,80		27,5		-2,5			
141,28		43,5		13,5			
142,80		43,5		13,5			
160,38		32,8		2,8			
165,13		32,5		2,5			
208,90		29,2		-0,8			
221,90		27,4		-2,6			
228,48		28,1		-1,9			
36,20		V		48,2		18,2	Quasi-Peak
36,20				32,4		2,4	
37,75				48,0		18,0	Peak
37,75	32,4			2,4	Quasi-Peak		
50,30	40,5			10,5	Peak		
50,30	25,5			-4,4	Quasi-Peak		
52,03	36,3			6,3	Peak		
62,84	33,8			3,8			
74,60	28,2			-1,8			
85,96	31,1			1,1			
119,13	35,5			5,5			
125,40	36,1			6,1			
142,50	41,8			11,8	Quasi-Peak		
142,50	32,3			2,3			
144,00	42,4			12,4	Peak		
144,00	32,4		2,4	Quasi-Peak			
165,10	30,1		0,1	Peak			
208,80	28,1		-1,9				
224,90	26,3	-3,7					
302,57	H	26,0	37,0		-11,0		
343,57		27,8			-9,2		
377,50		25,1			-11,9		
301,87	V	23,0		-14,0			
334,08		19,9		-17,1			
438,00		22,6		-14,4			

Установка по входу и выходу керамических конденсаторов Y-типа относительно заземления позволяет подавить напряжение возбуждения и свести к минимуму данный тип помех. Однако необходимо соблюдать особую осторожность, чтобы не превысить требование по току утечки [1]. В таблице приведены уровни индуктивных помех для модуля PQ48033QGA25NNS ($I_{\text{вых}} = 25 \text{ A}$, $U_{\text{вых}} = 3,3 \text{ B}$) по отношению к средним ограничениям класса B стандарта CISPR. Изменения проводились при полной нагрузке, тип нагрузки — резистивная. Данный модуль был протестирован с внешним фильтром, который был описан выше.

В целом можно констатировать, что комбинация модуля SynQoq и достаточно простого фильтра показывает приемлемый результат.

Заключение

Ключевой системой, которая зачастую влияет на всю ЭМС изделия, является система электропитания. Универсального решения, которое могло бы обеспечить ЭМС одинаково хорошо на всех устройствах, к сожалению, не существует. В любом случае систему необходимо анализировать в целом. При этом схемотехника модулей электропитания с фиксированной частотой преобразования существенно упрощает разработчикам проблему решения ЭМС.

Большое внимание необходимо уделять организации заземления и компоновки печатных слоев платы. В качестве перечня мер, которые помогут свести к минимуму кондуктивные и индуктивные помехи, можно отметить следующее:

- размещение низкочастотного танталового конденсатора и высокочастотного керамического конденсатора на выходной шине DC/DC-преобразователя как можно ближе к модулю питания;
- размещение низкочастотного танталового конденсатора и высокочастотного керамического конденсатора на входной шине DC/DC-преобразователя как можно ближе к входу модуля питания;
- использование максимально коротких проводников на всех внешних фильтрах и развязывающих компонентах для минимизации всех возможных токонесущих петель;
- более тщательная проработка вопроса разводки печатной платы, сведение к минимуму паразитных индуктивностей путем использования преимущественно широких полигонов;
- установка Y-конденсатора между силовыми проводниками и землей.

Литература

1. www.synqor.ru/documents/appnotes/appnt_emi_characteristics.pdf
2. <http://synqor.com>
3. www.ezop.ru
4. www.aeip.ru/images/Articles/article04.pdf
5. Воробьев С. Приведение системы электропитания к устойчивому состоянию // Силовая электроника. 2016. № 2.