

# Тенденция к миниатюризации: как решить проблемы ЭМС и целостности питания

Стив СЭНДЛЕР (Steve SANDLER)  
steve@picotest.com

Перевод, дополнения и комментарии:  
Владимир РЕНТЮК

**В статье обсуждаются три наиболее распространенные причины возникновения проблем обеспечения целостности питания и связанное с этим выполнение требований в части ЭМС. Также даны рекомендации, как избежать или минимизировать негативные проявления, возникающие из-за нарушений обеспечения целостности питания в проекте.**

## Введение

Для современной электронной аппаратуры, при одновременном увеличении производительности систем, росте скорости передачи данных и повышении эффективности работы, характерна устойчивая тенденция к постоянной миниатюризации и связанному с ней переходу на элементы в корпусах все меньших типоразмеров и форм-факторов. Более высокая эффективность (в данном контексте подразумевается коэффициент полезного действия) распределенных источников питания часто достигается за счет использования более быстрых кремниевых МОП-транзисторов (MOSFET) или даже превосходящих их скоростных нитрид-галлиевых транзисторов, выполненных по технологии eGaN. Что касается снижения габаритов конечного решения распределенных и смонтированных непосредственно на платах источников питания на основе DC/DC-преобразователей, то уменьшение занимаемой ими площади происходит за счет увеличения частот переключения и замены алюминиевых и танталовых конденсаторов меньшими по габаритам керамическими многослойными конденсаторами (MLCC).

Одним из результатов тенденции к миниатюризации является то, что в этом случае разработчики сталкиваются с большей взаимосвязью между такими разными и, на первый взгляд, несвязанными проблемами. Речь идет о поддержании требований по уровню собственных электромагнитных помех (ЭМП) и соблюдении норм по электромагнитной совместимости (ЭМС), а также об обеспечении целостности передачи сигналов (signal integrity, SI) и подачи питания (в англ. терминологии — power integrity, PI). Последнее еще не получило точного определения в русскоязычной технической литературе, но подразумевает достижение соответствия заданным характеристикам в передаче нужного напряжения и тока от источника

к месту назначения, то есть именно в точке питания непосредственной нагрузки.

ЭМП — величина электромагнитных излучений и наводок, создаваемых токами и напряжениями высокоскоростных сигналов, генерируемых системой. Что же касается целостности питания — это, как уже было сказано выше, показатель качества подачи электроэнергии на запитываемое устройство. Другими словами, для высокоскоростных устройств напряжение питания должно не только поддерживаться в допустимом диапазоне рабочих напряжений, но и гарантировать его надлежащее качество — уровень пульсаций и помех. Это связано с тем, что такие устройства, как приемники радиомодемов и трансиверов и малошумящие усилители, весьма чувствительны к шуму на шинах питания. Но это касается и таких на первый взгляд устойчивых к воздействию помех каскадов, как генераторы тактовой частоты. Причина кроется и в том, что данные шумы приводят к дрожанию фронтов сигналов синхронизации, или джиттеру, помехам в виде отражений, уменьшающим глазок на глазковой диаграмме канала данных, и ухудшению соотношения сигнал/шум (англ. signal-to-noise ratio, SNR) системы. Поскольку DC/DC-преобразователь по своей природе является источником шума, все перечисленные выше проблемы в той или иной степени связаны именно с обеспечением целостности питания. Вот почему разработчикам необходимо принять все соответствующие меры для того, чтобы генерируемые расположенными на плате DC/DC-преобразователями шумы не распространялись через систему питания и не влияли на характеристики системы в целом.

Мы выделили следующие три проблемы:

1. Высокочастотные затухающие колебания («звон»), возникающие на фронтах импульсных сигналов DC/DC-преобразователей и вызывающие резонансные пики в спектре излучения.

2. Генерация гармонических помех непосредственно самими DC/DC-преобразователями на рабочей частоте, которые являются следствием использования в них транзисторов с высокой скоростью переключения, то есть с крутыми фронтами импульсов с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), — это необходимое условие для уменьшения динамических потерь повышения КПД. Такие ключи могут генерировать гармоники основной частоты в виде коммутационных помех в полосе до гигагерцевой области.

3. Резонанс на шинах питания DC/DC-преобразователей или LDO-стабилизаторов, возникающий как следствие высокой добротности Q используемых конденсаторов, резонирующих с линиями подключения в слое распределения питания печатной платы.

## «Звон» и излучение электромагнитных помех

Любой «звон» на фронтах импульсных сигналов, а это довольно частое явление, может приводить к широкополосным резонансам в результирующем радиочастотном спектре. Резонансные частоты, возникающие в результате функционирования DC/DC-преобразователей или линейных стабилизаторов с низким падением напряжения на регулирующем транзисторе (англ. low dropout, LDO), могут лежать как в области низких частот (в районе нескольких килогерц), так и в области сотен мегагерц и выше. Последнее связано с явлением паразитного резонанса на линиях питания (в англ. терминологии — Power Delivery Network, PDN, он используется в современных программах для разводки печатных плат, а сами паразитные резонансы анализируются и минимизируются встроенными программными инструментами), свойственного преобразователям с быстродействующими МОП-ключами.

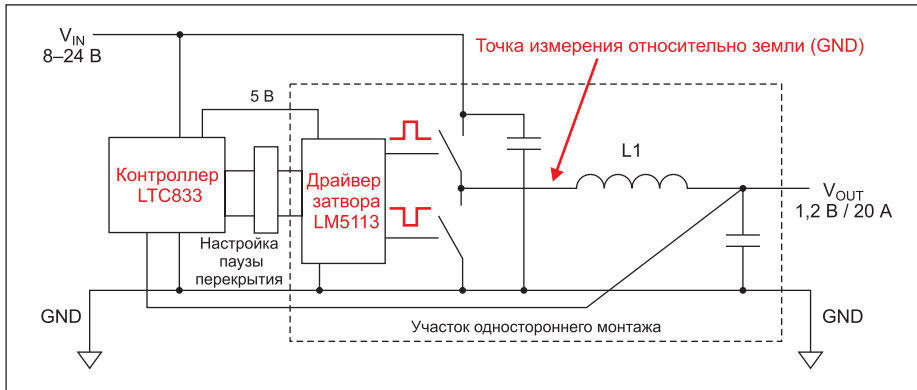


Рис. 1. Диаграмма, показывающая точку в месте соединения ключа (с левой стороны L1), в которой проводились измерения (по отношению к точке заземления)

Гармонические колебания, возникающие в результате переключения ключа, возбуждают паразитные резонансы линий подсоединения питания и резонансы непосредственно самого устройства и проявляются как «звон» во временной области. Токи и напряжения этих паразитных резонансных колебаний приводят к излучению ЭМП. Уровень рассматриваемых паразитных колебаний и уровень излучения ЭМП связаны с добротностью  $Q$  и характеристическим импедансом паразитного резонансного контура и гармонической энергией, создаваемой переключением ключей в DC/DC-преобразователях.

В качестве примера были измерены сигналы на ключах демонстрационной платы понижающего DC/DC-преобразователя. Процедура выполнялась с помощью осциллографа RTE 1104 компании Rohde & Schwarz и активного пробника RT-ZS20, имеющего входное сопротивление 1 МОм и полосу пропускания до 1,5 ГГц (рис. 1).

Как это ясно видно на рис. 2, на рабочем импульсе наложен очень большой затухающий гармонический сигнал с частотой 216 МГц.

Для измерения синфазного тока входной цепи (фиолетовая трасса) и дифференциального тока в цепи нагрузки вы-

ходной цепи (трасса цвета морской волны) DC/DC-преобразователя использовался токовый зонд F-33-1 компании Fischer Custom Communications. Обратите внимание (рис. 3) на большие резонансные пики на частоте 216 МГц (маркер 1) и его вторую гармонику на частоте 438 МГц (маркер 2).

### Рекомендации по решению проблемы

Существует несколько способов улучшить конструкцию таким образом, чтобы минимизировать резонансы и вызывающий их «звон» и, следовательно, снизить уровень излучаемых и наведенных (кондуктивных) ЭМП. Поскольку энергия этих паразитных резонансов тесно связана с рабочей частотой преобразователя, временем нарастания импульсов с ШИМ, характеристическим импедансом и добротностью  $Q$  паразитных резонансных контуров, то именно воздействие на эти факторы и помогает уменьшить их негативное влияние. Итак, необходимо учитывать следующее:

- Меньшая скорость нарастания импульса ухудшает эффективность работы ключа DC/DC-преобразователя, но уменьшает и уровень высокочастотных излучений.

- Тщательная разводка печатной платы и соответствующий выбор конденсатора минимизируют характеристический импеданс и добротность  $Q$ .
  - Проводники на печатной плате должны быть как можно более короткими и максимально широкими, а диэлектрик между слоями печатной платы — как можно тоньше.
  - Все элементы, связанные с ключом преобразователя, должны быть установлены на одной стороне платы, выполнить которую предпочтительно из тонкого диэлектрика, что поможет с возвратом высокочастотного тока через собственную емкость платы в соответствующий слой с заземлением.
  - Для демпфирования паразитных резонансов необходимо использовать снабберы (демпфирующие элементы) и конденсаторы со специально рассчитанным ESR (эквивалентным последовательным сопротивлением) или переработать конструкцию, заменив имевшийся ранее дроссель на катушку с меньшей индуктивностью рассеивания.
- Дополнительные сведения об измерении «звона» доступны в [1].

### Высокая скорость нарастания фронтов — высокий уровень помех

Современные встроенные в платы DC/DC-преобразователи используют рабочие частоты переключения до 3 МГц. Это является несомненным преимуществом, поскольку позволяет уменьшить физические размеры таких компонентов преобразователя, как дроссель и элементы фильтра, а также повысить его эффективность. Тем не менее высокие скорости нарастания импульса при ШИМ-регулировании создают широкополосный гармонический спектр, чья ширина связана с временем нарастания импульсов напряжения и тока. Так, скорость нарастания фронта в 1 нс может создавать гармоники на частотах до 3 ГГц или даже более.

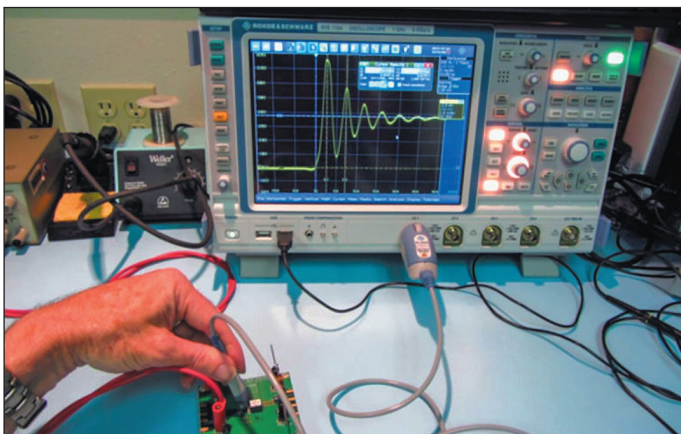


Рис. 2. Измерение «звона» на переднем фронте рабочего импульса DC/DC-преобразователя. Наблюдается достаточно сильный сигнал с частотой 216 МГц

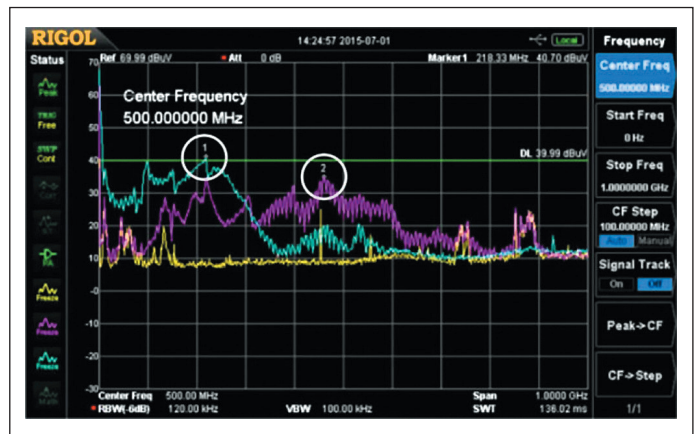


Рис. 3. Результирующие резонансы от «звона» с частотой 216 МГц (маркер 1) и его второй гармоники на частоте 438 МГц (маркер 2)

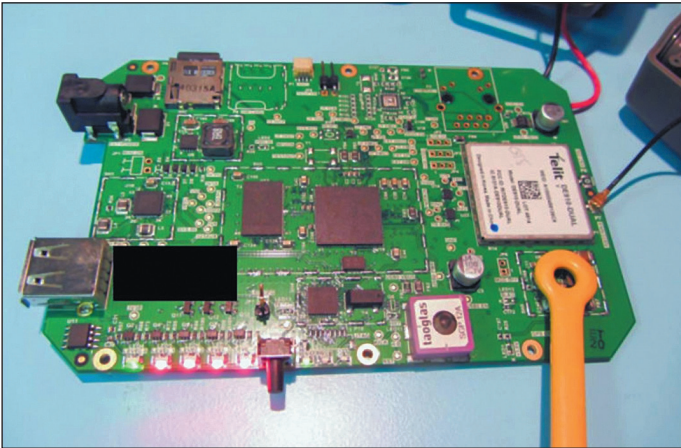


Рис. 4. Исследование источников шума DC/DC-преобразователя на типичном беспроводном устройстве

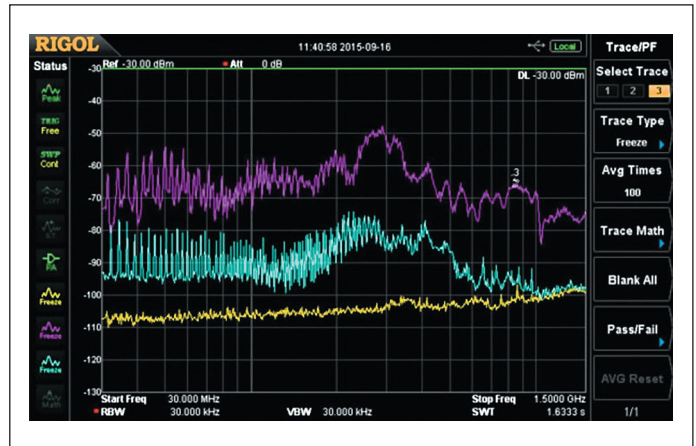


Рис. 5. Результат измерения связанных DC/DC-преобразователей

Эти широкополосные гармоники, их излучение и вызванные им наводки на другие части схемы становятся причиной сбоев и могут влиять на чувствительность приемника радиомодема и трансивера или других размещенных на плате беспроводных систем, например GPS. На рис. 4 показано, как типичная схема преобразователя постоянного тока может быть проверена на излучение с использованием датчика магнитного поля (Н-пробник), подключенного к анализатору спектра.

Для того чтобы получить представление о «звоне» без непосредственного нарушения цепи, можно подсоединить к осциллографу пробник магнитного поля в виде изолированной катушки, если таковой имеется, и подержать его возле каждого DC/DC-преобразователя на плате. Это поможет найти «виновного» и источник проблем.

На рис. 5 показано результирующее измерение связанных DC/DC-преобразователей. Желтая трасса представляет собой уровень окружающего шума измерительной системы и всегда является хорошей идеей для фиксации уровня ЭМП. Трасса цвета морской волны и фиолетовая — это измерения двух преобразователей. Обратите внимание, что оба они генерируют широкополосные токи помех до 1 ГГц, причем помехи от преобразователя, показанные фиолетовой трассой, выходят за пределы 1,5 ГГц и лежат на 20–50 дБ выше, чем уровень окружающего электромагнитного шума.

В этом примере мы оцениваем уровень помех в полосе 30 МГц – 1,5 ГГц, что позволяет в целом охарактеризовать профиль спектра излучений нескольких встроенных DC/DC-преобразователей. Они оба потенциально могут вызвать помехи для функционирования устройств сотовой связи, действующих в области частот 700–950 МГц. Как можно видеть, преобразователь с фиолетовой трассой дает помеху в полосе работы мобильных телефонов в среднем на 30 дБ выше уровня окружающего шума.

### Рекомендации по решению проблемы

Для того чтобы снизить риск возникновения помех для приемников мобильных телефонов и других беспроводных систем передачи информации, конструкция проектируемого изделия должна начинаться с оценки рисков в части ЭМС еще до возникновения этой проблемы. Итак, необходимо учитывать следующее:

- уделить максимальное внимание компоновке печатной платы;
- использовать фильтрацию по входу и выходу DC/DC-преобразователей;
- использовать фильтрацию в цепи питания любого высокочастотного устройства;
- использовать отдельную фильтрацию в цепи питания радиомодуля;
- использовать локальную защиту вокруг областей с высоким уровнем высокочастотных помех;
- оценить возможность применения экранирования всего продукта;
- оптимизировать размещение антенны.

Конструкция печатной платы имеет здесь решающее значение, и поэтому большинство усилий разработчика должно быть сосредоточено именно в данной области. Компоновка платы из восьми или десяти слоев даст максимальную гибкость при разделении цепей источников питания, аналоговых, цифровых и радиочастотных каскадов. Это обеспечит несколько плоскостей для возврата токов высокочастотной помехи на «землю», которые могут быть сшиты вокруг по краям платы, что позволит сформировать своеобразную клетку Фарадея. Необходимо также соблюдать известную осторожность, чтобы избежать загрязнение соседних каскадов помехами от обратных токов, особенно в точках подключения к плоскостям их возврата на «землю». Для беспроводных продуктов плоскость раздачи питания для радиопередающей секции должна быть изолирована (за исключением узкого моста) от плоскости питания и зазем-

ления цифровой части. Все печатные проводники на изолированной плоскости должны проходить через мост, соединяющий два слоя. Все это может обеспечить разделение между цифровой схемой и радиоприемной частью на уровне до 40 дБ.

Очень важно, чтобы слои платы, используемые для раздачи питания и возврата обратного тока на «землю», находились рядом, и в идеале расстояние между ними не превышало 3–4 мил. Такой подход благодаря наличию между слоями распределенной емкости связи обеспечит наилучшее подавление высокочастотных помех. Все сигнальные слои должны быть смежными, по меньшей мере с одной сплошной заземленной плоскостью. Трассы с сигналами тактовой частоты или с другими высокоскоростными сигналами не должны иметь переходных отверстий для передачи сигналов между каскадами устройства и не переходить с одного слоя платы на другой, то есть находиться на одной плоскости.

Секции формирования электропитания необходимо хорошо изолировать от чувствительной аналоговой или радиочастотной части (включая антенны). Следует помнить о первичных и вторичных токовых петлях и их возвратных токах, которые не должны использовать одни и те же траектории прокладки, что и трассы для цифровых, аналоговых или радиочастотных секций. Кстати, возвратные токи высокой частоты нужно вернуть к источнику непосредственно под местом его размещения. Для получения дополнительной информации об устранении проблем с особенностями использования и компоновки DC/DC-преобразователей для беспроводных радиоустройств обратитесь к [2].

### Паразитные резонансы на платах ПК и проблемы излучения ЭМП

Распространение шума в отдельно рассматриваемой системе может быть представлено совокупностью трех элементов: стабилизаторами напряжения, проводниками печатной

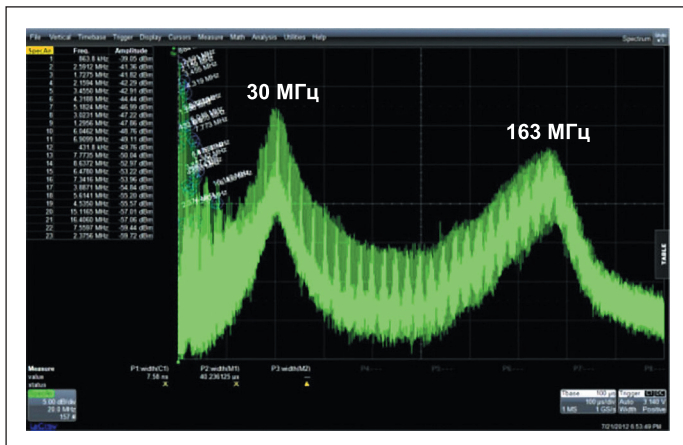


Рис. 6. На экране анализатора спектра представлены паразитные резонансы на частотах 30 МГц и 160 МГц, обнаруженные вблизи входа DC/DC-преобразователя, выполненного на базе контроллера LTC3880

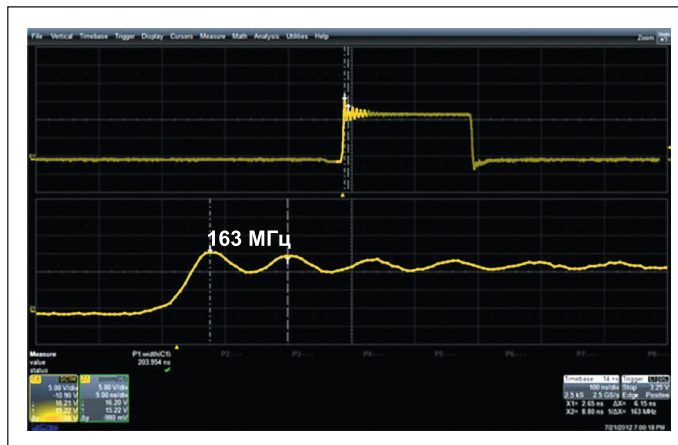


Рис. 7. Помеха на частоте 163 МГц легко объясняется «звоном» ключей DC/DC-преобразователя

платы с развязывающими конденсаторами на цепях питания и линиями питания непосредственно частей самого устройства, которые выступают в качестве нагрузки.

Каждый из этих элементов состоит из резистивных, индуктивных и емкостных составляющих. Даже «бесшумные» стабилизаторы с низким собственным падением напряжения, так называемые LDO-стабилизаторы (от англ. low dropout), могут иметь явно выраженный эквивалентный индуктивный импеданс [3]. Резистивные, индуктивные и емкостные компоненты как распределенные составляющие способны на резонансных частотах усиливать сигналы помех, создаваемых источником питания при их распространении по цепям питания к нагрузке, что приводит к излучению ЭМП. Такие резонансы на линиях питания возбуждают гармоники рабочей частоты переключения и «звон» ключа, о чем мы говорили выше [4]. Эти помехи не только приводят к ухудшению ситуации в части ЭМП, провоцируя возникновение кондуктивных помех, но и оказывают прямое негативное влияние на встроенные беспроводные устройства обмена информацией.

Краткое видео по ссылке [5] помогает объяснить основные принципы проектирования трасс раздачи питания. В качестве примера на рис. 6 представлены измеренные Н-зондом излучаемые ЭМП вблизи входа DC/DC-преобразователя, выполненного на базе контроллера LTC3880 компании Linear Technology.

Пик на частоте 163 МГц объясняется «звоном» ключей, как это ясно видно из осциллограммы, показанной на рис. 7. Этот сигнал является следствием индуктивности проводников подключения МОП-транзистора — ключа верхнего плеча, его физических выводов и проводников печатной платы, вызывающих паразитные резонансы в цепи МОП-транзистора (ключа нижнего плеча и резонансов с емкостями на самой печатной плате).

Входной керамический конденсатор резонирует примерно на частоте 30 МГц, как показано на рис. 8, и, соответственно, приводит к большому выбросу ЭМП на этой частоте.

Участок входной цепи измеренного DC/DC-преобразователя (полученные результаты приведены на рис. 6) представлен на рис. 9 со схематическими изображениями компонентов, платы и внешних соединений.

Для иллюстрации эффектов паразитного резонанса можно предложить простой и наглядный пример с использованием компьютерного моделирования. Рассмотрим одиночный DC/DC-преобразователь так, как показано на рис. 10.

Разработчики печатных плат часто размещают ключи, выполненные на МОП-транзисторах, на одной стороне платы с вводом питания на противоположной стороне. Небольшая часть платы, используемая в этом примере, имеет вход питания через пару штырьков, так что для подключения питания к плате не добавляется индуктивность

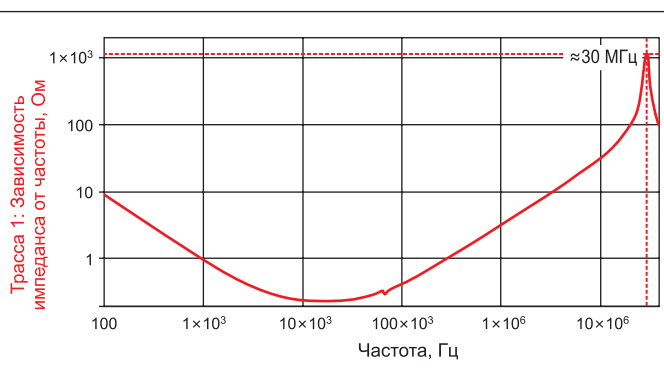


Рис. 8. Большой уровень излучения с частотой 30 МГц, выявленный с помощью Н-зонда, идентифицируется как резонанс печатной платы и подтверждается измерением импеданса входного конденсатора

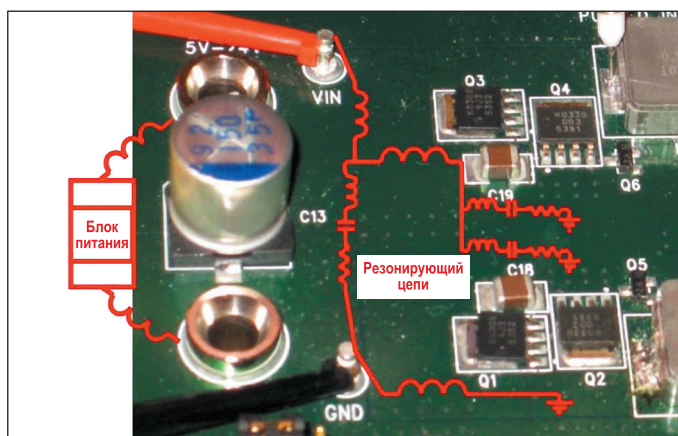
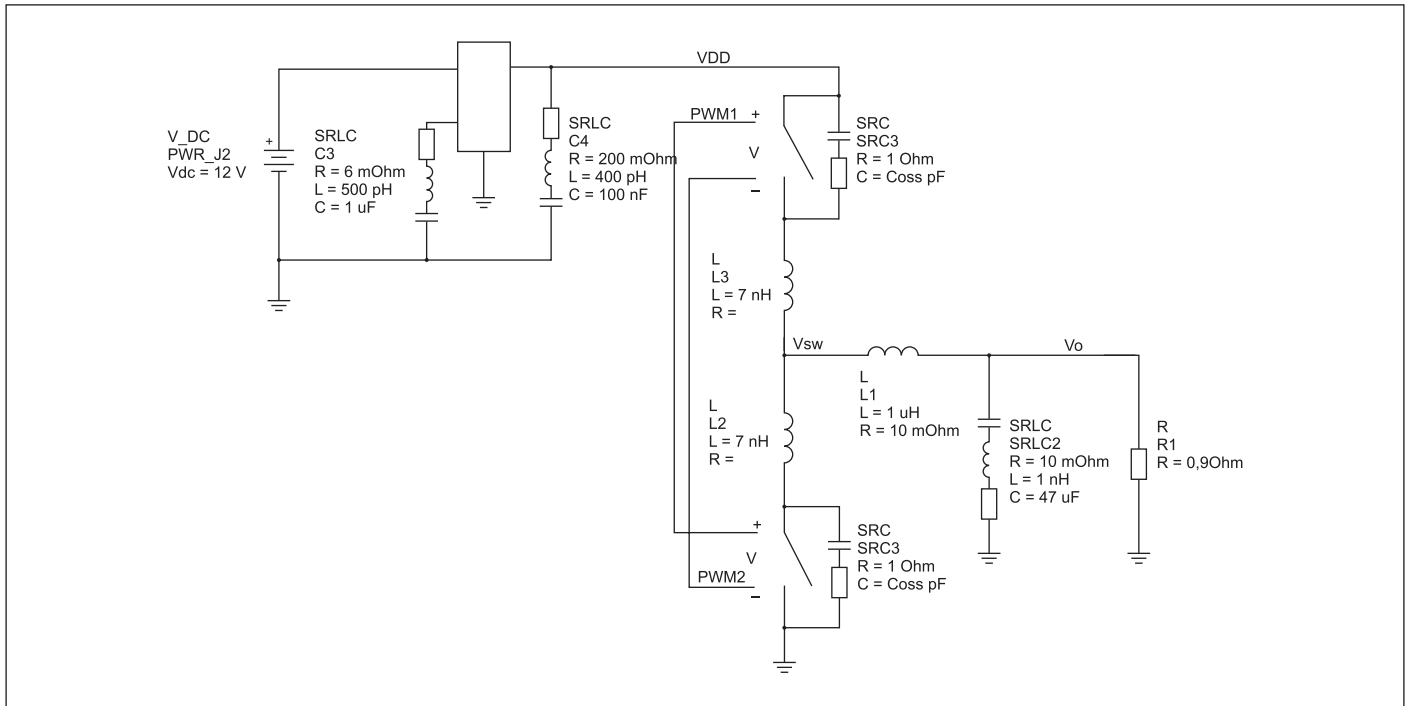
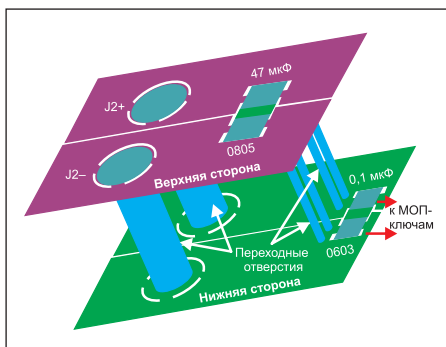


Рис. 9. Часть размещения цепи питания на базе DC/DC-преобразователя, на котором проводились измерения (рис. 6), со схематическими изображениями компонентов, платы и внешних соединений

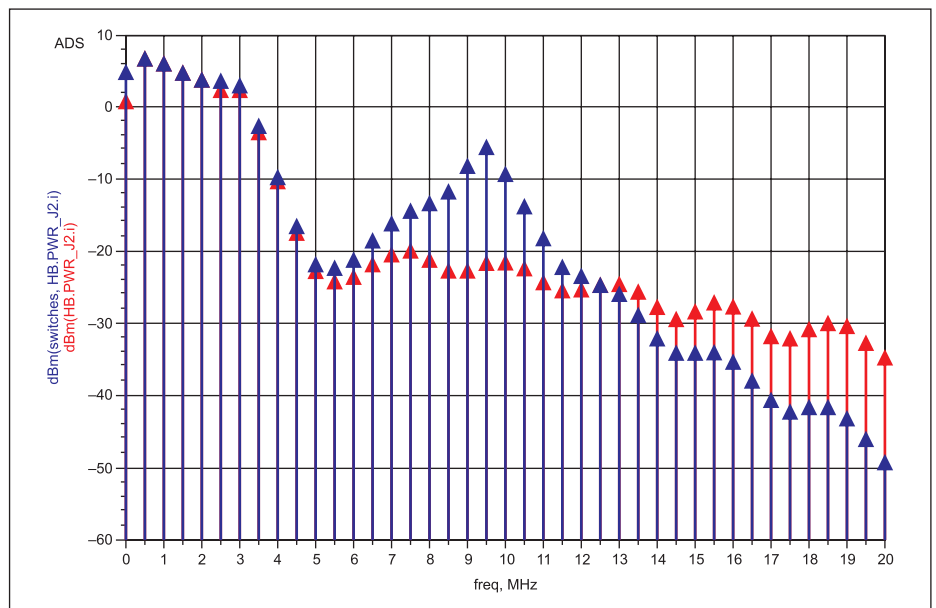
связи. Большой керамический конденсатор емкостью 47 мкФ находится на верхней стороне платы, в то время как меньший керамический конденсатор емкостью 0,1 мкФ расположен очень близко к ключам на нижней стороне платы. Питание и «землю» с верхней стороны печатной платы на нижнюю сторону соединяют по две параллельные переходные линии связи (переходные отверстия), как показано на рис. 11.



**Рис. 10.** Модель DC/DC-преобразователя, использованная для иллюстрации генерации ЭМП в цепях подключения питания. Ключи, обозначенные как FET, содержат индуктивность выводов и емкость стока (Coss). В составе модели также имеется небольшая плата и два керамических конденсатора



**Рис. 11.** Большие круглые контакты слева — это разъем подключения питания, J2. Большой конденсатор на верхней стороне типоразмера 0805 имеет емкость 47 мкФ, а меньший конденсатор на нижней стороне типоразмера 0603 имеет емкость 0,1 мкФ



**Рис. 12.** Результат спектрального моделирования по входу DC/DC-преобразователя показывает, что высокодобротные керамические конденсаторы с ESR, равным 10 мОм (спектр обозначен синим цветом), имеют явный пик в районе 10 МГц, который исключается при использовании специально выбранного керамического конденсатора с низкой добротностью благодаря более высокому ESR, равному 200 мОм (спектр изображен красным цветом)

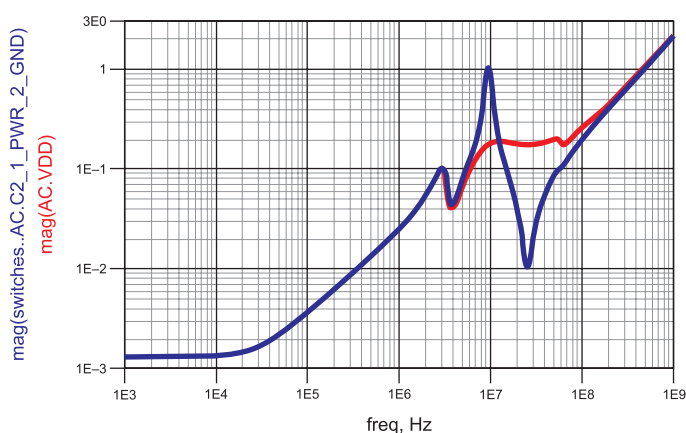
Эта простая модель предназначена для моделирования гармонического тока на входном разъеме, который непосредственно связан с кондуктивными и излучаемыми ЭМП. Здесь выполнялось два варианта моделирования. Первый — с керамическим конденсатором, имеющим низкое ESR, а второй — с более низкой добротностью Q. Это достигается применением керамического конденсатора емкостью 0,1 мкФ со специально выбранным расчетным значением ESR, который был установлен взамен штатного конденсатора такой же емкости и тоже близко расположен к МОП-ключам. Оба результата моделирования показаны на рис. 12.

Моделируемый импеданс, измеренный на меньшем по емкости конденсаторе и при-

веденный на рис. 13, показывает соответствующее подавление резонанса с четким пиком 10 МГц, который был ярко выражен при использовании керамического конденсатора с высокой добротностью Q (показан синим цветом). Этот пик устраняется с помощью низкодобротного керамического конденсатора с более высоким значением ESR (изображен красным цветом).

### Рекомендации по решению проблемы

Для минимизации резонансов в цепях передачи питания нужно тщательно сбалансировать полную систему — сам стабилизатор напряжения, линии подключения и нагрузку. В линии питания для устранения или минимизации добротности и подавления



**Рис. 13.** Моделируемый импеданс на конденсаторе для конденсатора емкостью 0,1 мкФ с использованием высококачественного конденсатора с ESR, равным 10 мОм (показано синим цветом), и специально выбранного низкодобротного конденсатора с ESR, равным 200 мОм (показан красным цветом)

резонансов также должно быть включено демпфирующее сопротивление. Итак, необходимо учитывать следующее:

- Для трасс распределения питания использовать короткие, широкие проводники.
- Минимизировать площадь размещения DC/DC-преобразователя, что поможет свести к минимуму паразитные индуктивности.
- Применять как можно более тонкие слои диэлектрика между слоями на печатной плате.
- Включить в своей программе для разводки печатной платы инструмент или режим электромагнитного моделирования, что поможет заранее определить и минимизировать паразитные резонансы в цепях раздачи питания.
- Устанавливать конденсаторы по возможности на одной стороне платы, это уменьшит паразитную индуктивность их подключения.
- Помнить, что из-за более высокого значения ESR конденсаторы с низкой добротностью Q уменьшают общую добротность паразитных резонансных цепей и линий связи по питанию.
- Правильно выбирать стабилизаторы напряжения и их выходные конденсаторы. Это необходимо делать с учетом обеспечения стабильности контура регулирования выходного напряжения.
- Не размещать вырезы или отверстия в слоях заземления, лежащих ниже слоя раздачи питания.

- Хорошей практикой является правильное применение ферритовых помехоподавляющих элементов; при неправильном размещении они могут стать причиной возникновения паразитных резонансов.
- Помнить об индуктивном характере переходных отверстий, они также могут быть причиной резонансов и излучения ЭМП.

Конструкция печатной платы и хорошая развязка, несомненно, критически важны, но традиционные подходы обычно не работают в схемах с высокоскоростными сигналами. Конструкция печатной платы, выбор и размещение конденсаторов в шинах и цепях питания всегда являются следствием тех или иных компромиссов, но их воздействие на резонансы необходимо тщательно взвешивать. Для этой цели весьма полезен многочастотный генератор гармонических частот, который поможет быстро выделить все имеющиеся паразитные резонансы в цепях питания [3].

### Заключение

Проектирование печатных плат с установленными на них DC/DC-преобразователями, LDO-стабилизаторами, а также организация раздачи питания для современных устройств с их высокоскоростными сигналами требует не только тщательной проработки схемы и соответствующей фильтрации, но и моделирования поведения трасс раздачи питания. Здесь необходим очень тщательный подход к ком-

поновке печатных плат и использованию фильтров с правильно выбранными конденсаторами в части значения их ESR. Помните, неправильно выполненные проекты могут привести к следующим проблемам:

- «Звону» в цепях питания от ключей DC/DC-преобразователей или какого-либо другого цифрового сигнала с крутыми фронтами, что приводит к недопустимо высокому уровню кондуктивных и излучаемых ЭМП, которые проявляются в виде пиков на основной частоте и гармониках такого паразитного колебания.
- Возникающий высокочастотный широкополосный шум может значительно превышать диапазон 1 ГГц, что вызывает нарушение работы интерфейсов беспроводной связи.
- Плохая стабильность и резонансы в недемпфированных трассах распределения питания приводят к нестабильности работы устройства, паразитным резонансам и связанным с ними кондуктивным и излучаемым ЭМП.

Все эти нарушения способны стать причиной того, что разработчик не сможет пройти сертификационные испытания [6] и вывести спроектированное устройство на рынок. ■

### Литература

1. Wyatt K. GaN Technology and the Potential for EMI (EDN). [www.edn.com/electronics-blogs/the-emc-blog/4439839/GaN-technology-and-the-potential-for-EMI](http://www.edn.com/electronics-blogs/the-emc-blog/4439839/GaN-technology-and-the-potential-for-EMI)
2. Wyatt K. Platform Interference (EDN). [www.edn.com/electronics-blogs/the-emc-blog/4441086/Platform-interference](http://www.edn.com/electronics-blogs/the-emc-blog/4441086/Platform-interference)
3. Wyatt, Review: Picotest J2150A Harmonic Comb Generator. [www.edn.com/electronics-blogs/the-emc-blog/4440532/Review-Picotest-J2150A-harmonic-comb-generator](http://www.edn.com/electronics-blogs/the-emc-blog/4440532/Review-Picotest-J2150A-harmonic-comb-generator)
4. Sandler S. The Inductive Nature of Voltage Control Loops. [www.edn.com/electronics-blogs/impedance-measurement-rescues/4438578/The-inductive-nature-of-voltage-control-loops](http://www.edn.com/electronics-blogs/impedance-measurement-rescues/4438578/The-inductive-nature-of-voltage-control-loops)
5. Sandler S. How to Design for Power Integrity: Finding Power Delivery Noise Problems (Video). [www.youtube.com/watch?v=oL6qjhJH\\_m4&t=4s&list=PLtq84kH8xZ9HIYg-BYDsP7TbqBpftidzI8&index=4](http://www.youtube.com/watch?v=oL6qjhJH_m4&t=4s&list=PLtq84kH8xZ9HIYg-BYDsP7TbqBpftidzI8&index=4)
6. Рентюк В. Что нужно знать об испытаниях на выполнение требований по ЭМС для изделий коммерческого назначения // Компоненты и технологии. 2017. № 7.