

# Особенности конструирования печатных плат с выполнением требований по ЭМС: подробнее о разбиении платы на области и маршрутизации

Кеннет УАЙТТ (Kenneth WYATT)  
[ken@emc-seminars.com](mailto:ken@emc-seminars.com)

Перевод и дополнения:  
 Владимир РЕНТЮК  
[rvk.modul98@gmail.com](mailto:rvk.modul98@gmail.com)

**Основная задача при проектировании современного электронного оборудования самого различного назначения — не только достижение заданной, как сейчас принято говорить, производительности, но и выполнение требований по электромагнитной совместимости (ЭМС) [1]. В решении проблемы ЭМС нет мелочей, и наравне со схемными и общими конструктивными решениями особого внимания требует еще и дизайн печатной платы. Предлагаемая статья является продолжением предыдущей публикации [2] и основана на новой, четвертой и последней, публикации в блоге “The EMC Blog”<sup>1</sup> (The EDN Network) [3].**

В последней части [2], посвященной проектированию печатных плат для достижения низкого уровня электромагнитных помех (ЭМП), — «Разбиение платы на области и маршрутизация», выполненной на основании перевода [4], было рассмотрено разделение слоев печатной платы и объяснялось, почему так важно в общем диэлектрическом пространстве платы не допустить перекрестной связи «шумных» с точки зрения ЭМП сигналов с «тихими» и чувствительными к ним слоями. В этой статье будет более подробно рассказано о подобном разделении. Хотя концепция разбиения достаточно проста, при разработке реальных плат обычно необходимо все хорошо взвесить и как следует обдумать, поскольку в итоге получится то, что мы называем обеспечением электромагнитной совместимости, и эту проблему желательно решить с первого раза или со второго, но с минимальной доработкой.

Разделение слоев особенно важно, когда речь идет о проектах со смешанными сигналами, таких как комбинация каскадов и цепей с аналоговыми и цифровыми сигналами или цифровых каскадов с уже давно популярным и вошедшим в практику беспроводным радио, или и то и другое вместе. Например, многие разработчики объединяют беспроводную связь (сотовую связь, Wi-Fi, Bluetooth и GPS) наряду с цифровой обработкой, а иногда и аналоговой (например, аудиоусилители или видео) частью. А ведь есть

еще и интерфейсы, к которым нужно удобно подключиться, а это накладывает ограничения на общее конструктивное решение. Для небольших мобильных устройств или устройств «Интернета вещей» (Internet of Things, IoT), который уже насыщен беспроводными технологиями (подробности в серии статей, первая из них — [5]), чтобы исключить влияние цифровых импульсных сигналов, часто с крутыми фронтами, на чувствительные приемники, надлежащее разделение функциональных узлов схемы становится обязательным.

Это не менее важная проблема и для сотовых беспроводных продуктов, которые используют полосы LTE [13] (в США в диапазоне 700–900 МГц, в РФ 761–862 МГц по восходящей и нисходящей связи), вплоть до приемников глобальной системы навигации и определения положения — GPS. ЭМП от цифровых процессоров, памяти и импульсных источников питания могут генерировать энергию гармоник и вне коммерческих частот GPS (1575,42 МГц). Современные микросхемы контроллеров DC/DC-преобразователей, с одной стороны, просто прекрасны, но с другой — особенно неприятны из-за их очень высоких граничных скоростей фронтов импульсов, часто менее 1 нс, и высоких рабочих частот преобразования — обычно 1–3 МГц, что связано с требованиями по уменьшению габаритов за счет силовых дросселей и конденсаторов фильтров.

## Еще раз к вопросу разбиения платы на области и маршрутизации

В [2] был представлен пример того, как оптимально разделить функциональные узлы схемы на печатной плате. Чтобы не отсылать вас к первоисточнику, повторим эту концепцию разделения (рис. 1).

Все разъемы питания и порты ввода/вывода (I/O) должны быть отфильтрованы и защищены от влияния переходных процессов, а для достижения минимального уровня ЭМП, если это возможно, они должны быть сгруппированы на одном краю платы.

Здесь, сохраняя все функции схемы раздельными, мы избегаем загрязнения тихих сигнальных цепей шумовыми сигналами. Концепция проста и понятна, но часто труднодостижима для реальных плат. Это проблема из серии «гладко было на бумаге, да забыли про овраги», которая с общей концепцией, показанной на рис. 1, состоит в том, что для реальных конструкций платы нам, кроме тех, что были описаны в [1], нужно рассмотреть и ряд других, не менее важных моментов.

Например, такой вопрос, как маршрутизация шины тактовой частоты. Автор перевода статьи должен сказать, что это не просто сложная, а весьма болезненная с точки зрения выполнения требований по ЭМС проблема, и ей нужно уделить самое пристальное внимание. Возможно, при ее решении вам даже придется пойти на снижение скорости нарастания/спада фронтов тактовых импульсов. Кроме того, разработчик, находясь в трезвом уме и светлой памяти, скорее всего,

<sup>1</sup> Кеннет Уайтт (Kenneth Wyatt) — президент и главный консультант компании Wyatt Technical Services LLC, а также старший технический редактор журнала Interference Technology Magazine, ведет блог по проблемам ЭМС. Кеннет более 30 лет проработал в области ЭМС и специализируется на устранении неисправностей, связанных с ЭМП, и решении проблем сертификации на соответствие требованиям по ЭМС.

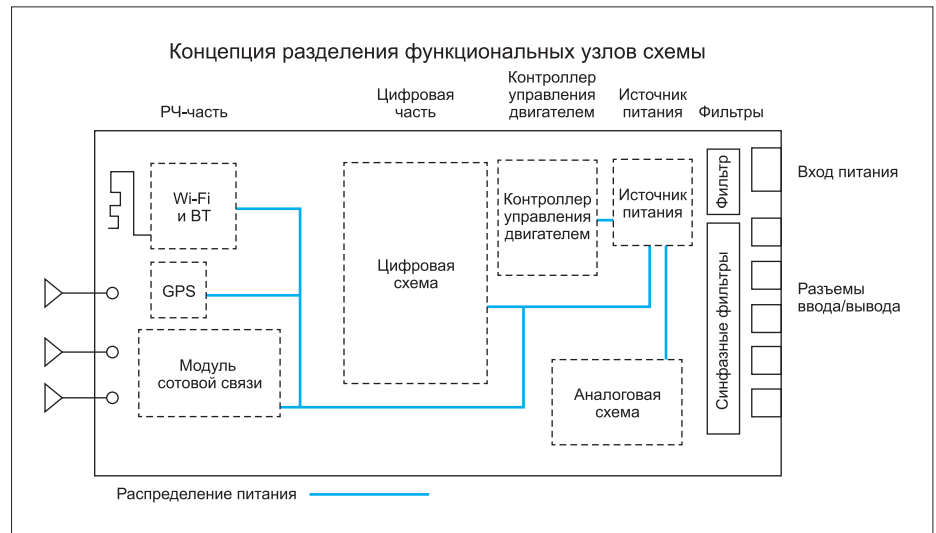
не рискнет тянуть сигнальные линии Ethernet или USB так, чтобы они шли по всей плате. Следовательно, одним из важных аспектов будет расположение этих функциональных узлов как можно ближе к связанным с ними разъемам, как это показано на рис. 2.

Кроме того, что несомненно имеет смысл — размещать схемы импульсных источников питания как можно ближе к тому, что они питают, — есть еще один момент. При этом крайне важно, чтобы все схемы DC/DC-преобразователей, даже если они синхронизированы (что реализуемо, но на практике встречается крайне редко), были связаны в одном и том же слое печатной платы, при этом не забываем: должна быть и смежная с их подключением плоскость для возвратных токов, проще говоря, заземляющая. В размещении функциональных элементов питания (имеется в виду на основе импульсных преобразователей) максимально близко к нагрузке есть не только несомненные плюсы, но и исключения: желательно избегать близкого расположения DC/DC-преобразователей к беспроводным модулям или их отдельным схемам, особенно рядом с антеннами. Здесь можно считать, автор перевода применил такой способ: общая шина формировалась удаленным (в рамках печатной платы) понижающим DC/DC-преобразователем, а питание на синтезатор частоты обеспечивалось установленным по выходу преобразователя и используемым в качестве фильтра линейным стабилизатором напряжения с малым собственным падением напряжения (LDO, low dropout).

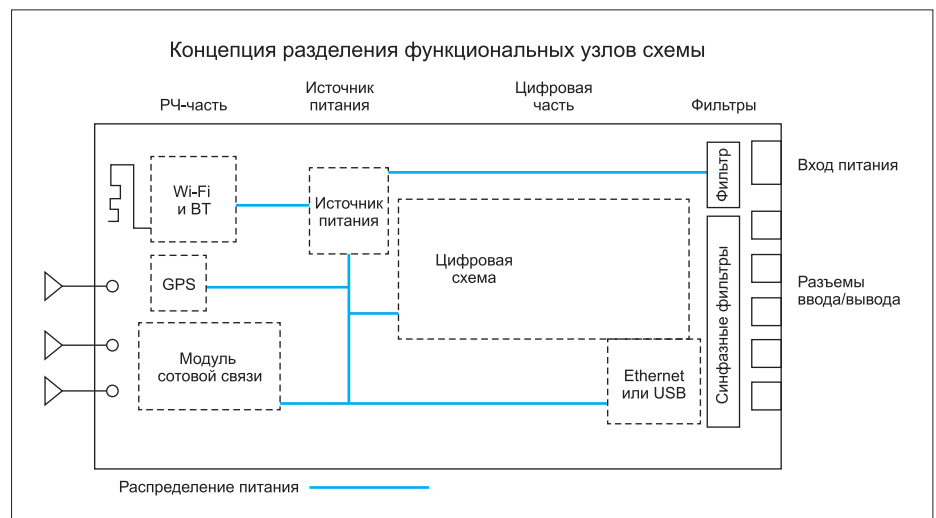
На рис. 1, 2 цепи распределения питания обозначены жирными синими линиями. Фактически распределение питания на реальных платах, вероятнее всего, будет представлять собой комбинацию плоскостей питания (обычно 3,3 В) и полигонов слоев питания («залитых» медью больших областей) или более широких трасс для других требующих мощности силовых шин. Это распределение питания также должно иметь соседнюю плоскость для возврата тока, которая захватывает переходные поля из-за токов переключения, вызванных скачками потенциала «земляной» шины (ground bounce, буквально: «отскок от земли») — в электронной технике это явление обычно связано с переключением ключей, когда из-за действия помехи, вызванной паразитной индуктивностью, напряжение на затворе полевого транзистора может казаться меньше, чем локальный потенциал «земли»), или шума одновременного переключения (simultaneous switching noise, SSN) [2], что довольно-таки обычное явление.

## Использование скин-эффекта

В жизни бывают интересные или счастливые возможности, например, как на известной картине французского художника Жана Оноре Фрагонара, одно из названий которой «Счастливые возможности качелей».



**Рис. 1.** Концептуальная схема, демонстрирующая оптимальное разделение платы на функциональные узлы  
**Примечание.** Размещайте аналоговые каскады как можно дальше от цифровых каскадов и контроллера управления двигателем, а импульсные преобразователи схемы питания и контроллер управления двигателем — рядом с точкой входа питания.



**Рис. 2.** Пример наиболее приемлемого с практической точки зрения разделения платы на функциональные узлы  
**Примечание.** В некоторых случаях более целесообразно размещать импульсные источники питания рядом с их нагрузкой, технология PoL (Power of Load — питание в нагрузку). При этом убедитесь, что соответствующие контуры больших токов минимальны. Важно, чтобы шины с быстрыми сигналами по портам ввода/вывода, то есть от таких функциональных каскадов, как передатчики Ethernet и USB, были расположены как можно ближе к их разъемам. Также обратите внимание на то, чтобы сигналы тактовой частоты не блуждали по всей плате.

Так и в нашем случае есть милая счастливая хитрость. Оригинальный метод разделения плоскостей печатной платы заключается в использовании противоположных сторон одной и той же плоскости заземления для отделения цифровых и радиочастотных или тех и других от аналоговых цепей. Для этого мы можем использовать известный феномен, связанный с зависимостью глубины проникновения поля от частоты, а именно скин-эффект. Возможность такого подхода обусловлена тем, что скин-эффект на высоких частотах, характерных для цифровых и радиочастотных сигналов (цепей), заставляет их возвратные токи проходить только вдоль поверхности плоскости заземления. Если сделать этот слой достаточной толщины, такой, чтобы возвратные токи не смешивались, он будет восприниматься как две

разные заземляющиеся плоскости, расположенные близко друг к другу, но не соприкасающиеся на этих высоких частотах.

Объемная плотность тока максимальна у поверхности проводника. При удалении от поверхности она убывает экспоненциально и на глубине  $\Delta$  становится меньше примерно на 70%. Эта глубина называется толщиной скин-слоя. Для расчета его толщины можно воспользоваться формулой:

$$\Delta = 1/\sqrt{\pi \times \mu_0 \times \mu_r \times f \times \sigma},$$

где  $\Delta$  — глубина проникновения (м);  $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума;  $\mu_r$  — относительная магнитная проницаемость материала;  $\sigma$  — проводимость материала;  $f$  — частота переменного тока.

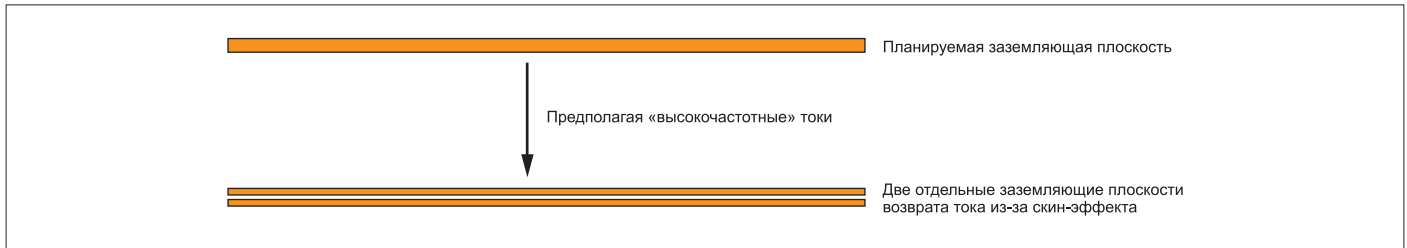


Рис. 3. Скин-эффект на высоких частотах теоретически может разделить одну плоскость на две отдельные, но близко расположенные друг к другу. Возвратные токи от одного источника не будут загрязнять помехами обратные токи для другого

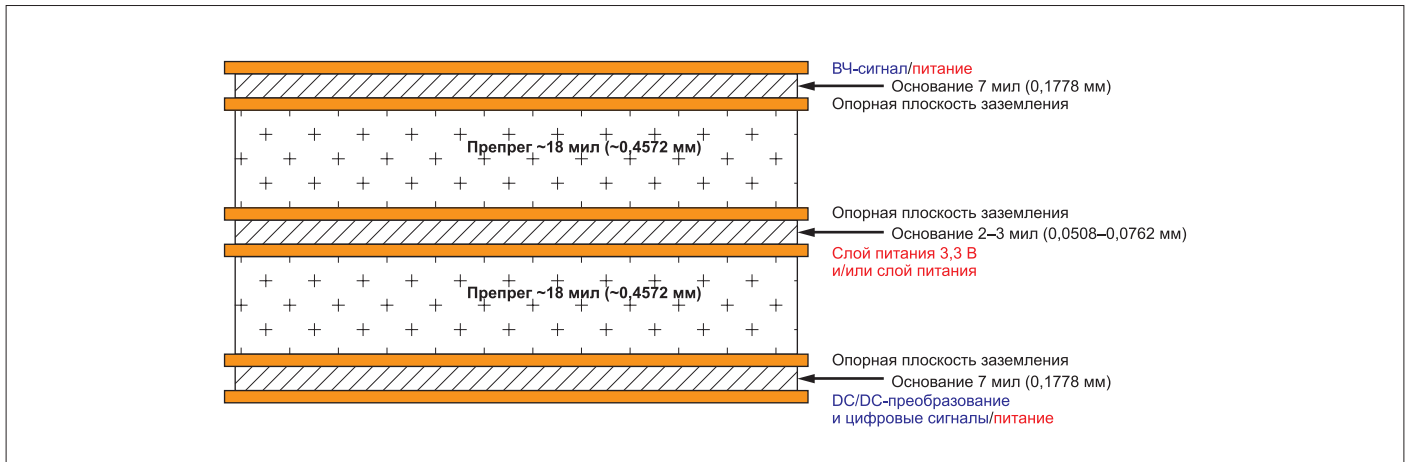


Рис. 4. Пример разделения слоев печатной платы с отделением зашумленных цепей на нижней стороне от подверженных загрязнению помех чувствительных цепей на верхней стороне

В металле (приблизительно) может быть использовано следующее уравнение, приведенное в оригинале статьи [3]:

$$\delta = 2,6/\sqrt{f\mu_r\sigma_r}$$

где  $\mu_r$  — относительная магнитная проницаемость материала;  $\sigma_r$  — удельная проводимость материала;  $f$  — частота переменного тока.

Согласно этому уравнению, на частоте 10 МГц глубина скин-эффекта в меди составляет 0,8 мил (20,32 мкм), а на частоте 100 МГц — 0,26 мил (6,604 мкм). Большая часть тока сигнала будет именно в этой области медной плоскости. Можно также использовать доступные таблицы.

Поскольку медная плоскость в одну унцию имеет толщину 1,4 мил (35,56 мкм), то вы можете видеть, что обратные токи сигналов, протекающие по каждой стороне медной плоскости, вряд ли встретятся в ее середине. Таким образом, мы создаем теоретический «двойной слой» медной проводящей плоскости (рис. 3). Это счастливая возможность, не правда ли? Ну прямо почти по Фраганару.

Обратите внимание, что рис. 3 не показывает стек печатной платы, а пытается изобразить физику единственной возвратной плоскости, действующей как две «отдельные» плоскости на высоких частотах. Другими словами, токи сигнала на одной стороне не будут загрязнять токи на другой стороне сплошной плоскости возвра-

та. То есть концептуально здесь показана одна плоскость возврата «земли» (вверху рисунка), действующая как две независимые плоскости возврата «земли» из-за скин-эффекта (внизу рисунка).

В качестве примера на рис. 4 представлено практическое решение формирования тока слоев печатной платы, использующее изложенную выше концепцию. Этот вариант успешно применяется производителями мобильных устройств. Если мы заполним верхнюю сторону платы всеми радиочастотными/беспроводными компонентами, а нижнюю — каскадами с цифровым преобразованием, преобразованием мощности и управлением (при этом осторожно добавляя пути возврата ко всем сигналам, переходящим сверху вниз), то теоретически энергия поля из верхней плоскости не будет загрязнять токи в другой.

Обратите внимание, что необходимо сохранять слой распределения основного питания (обычно 3,3 В) в центре стека. Очень сложная схема, вероятнее всего, потребует дополнительных слоев, в зависимости от количества функциональных узлов схемы. Одним из недавних примеров, который рассматривал автор этой статьи, была мобильная видеоплатформа с сотовой связью, Wi-Fi, Bluetooth, цифровым видео и аудио. В ней для разделения функциональных блоков применен 10-слойный стек. Конечно, есть много способов достичь этой цели, тем не менее при принятии конкретного решения используйте рис. 4 в качестве одного из наглядных примеров.

## Расщепление слоев

Автора предлагаемой статьи, как известного специалиста в области решения проблем ЭМС, часто спрашивают о том, как разделить аналоговые и цифровые плоскости, причем так, чтобы изолировать цифровые шумовые токи от чувствительных к ним аналоговых интерфейсов и сигналов. В этом направлении многие производители АЦП и ЦАП не забывают про нас, разработчиков, и для решения этой проблемы предлагают соответствующие варианты в своих примечаниях по применению (известных всем разработчикам Application Note) и даже предоставляют рекомендации по компоновке печатных плат (рис. 5).

По этому вопросу еще продолжают дебаты, но автор статьи считает (автор перевода также присоединяется к его мнению), что существуют определенные условия, которые оправдывают данный подход. Для большинства проектов, если вы используете правильное разделение, это в значительной мере обеспечит изоляцию между шумными и чувствительными каскадами схемы, в том числе и для приложений, содержащих АЦП и ЦАП. Для этих последних случаев просто важно держать аналоговые трассы подальше от цифровых. Кроме того, что вполне очевидно, через это расщепление не должны проходить какие-либо трассы. По горькому опыту автора перевода, цифровые сигналы необходимо также удалять и от цепей обратной связи операционных усилителей,

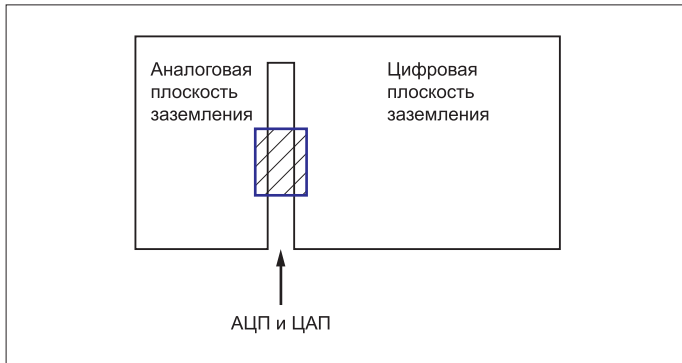


Рис. 5. Концепция расщепленной плоскости, часто предлагаемая для плат с АЦП или ЦАП

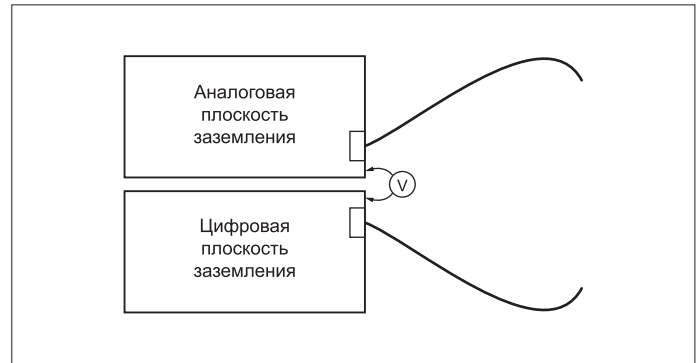


Рис. 6. Две отдельные плоскости могут индуцировать потенциал напряжения между ними, а затем излучать помеху, как дипольная антенна

здесь даже небольшая емкостная связь приводит к нарушению целостности аналоговых сигналов.

Однако вернемся к описываемой проблеме разделения слоев заземления. Реальная проблема при разделении этих плоскостей состоит в том, что между ними всегда будет существовать некоторый высокочастотный перепад напряжения, и если геометрические размеры плоскостей с их соединительными кабелями ввода/вывода приближаются к длине полуволны, то их можно воспринимать как своеобразную дипольную антенну, что может привести к излучению ЭМП и различным проблемам с ЭМС, причины которых вы будете долго и безуспешно искать (рис. 6).

Одним из немногих исключений (есть еще и несколько других, таких как удаленные датчики) является необходимость изоляции пациента от медицинского оборудования, работающего от линии электросети. Более подробно о тонкостях и сложности выполнения требований по безопасности медицинской аппаратуры в [6, 7]. Мы же ограничимся рассматриваемым вопросом.

На рис. 7 показана типичная схема заземления, где схема аналогового зонда связана с аналоговым заземлением, схема цифровой обработки — с цифровым заземлением, а источник питания — со своим. Цифровые шины заземления и заземление питания в идеале должны быть соединены вместе на разъеме питания. Само устройство обеспечения гальванической развязки (то есть изоляции) может представлять собой специализированную интегральную схему, например [8], оптический изолятор или другие подобные устройства.

Есть еще одна область техники, которая сложна для проектирования печатных плат. На практике проектирование реальных плат для компьютерных и комплексных схем — занятие не для слабонервных. Здесь всегда необходимо искать компромисс между разделением цепей, решениями по формированию стека и маршрутизацией питания и высокочастотных сигналов. Однако задача облегчается, если соблюдены три основных правила проектирования:

- всегда располагайте рядом плоскость возврата (заземление) для сигнала и распределения питания;
- убедитесь, что всегда имеется путь обратного тока при переходе через слои;
- разделите как можно лучше различные по принципам функционирования каскады и цепи.

### Заключение

Только при внимательном и грамотном подходе у вас будет больше шансов сохранить создающие помехи сигналы вдали от чувствительных к ним трасс и цепей. При этом риск излучения ЭМП и проблемы с весьма непростой сертификацией на выполнение требований по ЭМС (еще раз обратите внимание на цикл статей [1]) значительно снизятся. Кроме того, описанные в настоящей статье и в [2] подходы и рекомендации помогут решить проблемы, связанные с устойчивостью к разрядам статического электричества (ESD), и обеспечить целостность сигнала.

Автор статьи и автор перевода искренне надеются, что представленная статья вместе с переводом ее первых трех частей, приведенном в [2], окажется полезной. Проблема в том, что мало где учат решению изложенных в этих публикациях проблем, а большая часть технической литературы по конструированию печатных плат и практических рекомендаций просто ошибочна.

Прежде всего, помните, что высокочастотные цифровые сигналы распростра-

няются в диэлектрическом пространстве, а не через медь. Как только вы это поймете, то сможете избежать проблем, связанных с тем, что создающие помехи цифровые сигналы будут использовать то же диэлектрическое пространство, что и низкочастотные аналоговые или радиочастотные сигналы, и только в этом случае у вас будет гораздо больше шансов «сделать все правильно и с первого раза» и не кусать локти.

Для всех конструкторов печатных плат автор статьи настоятельно рекомендует изучить материал по дизайну печатных плат с оптимизацией ЭМП и сохранению целостности сигнала [9] (можно пройти семинар), ознакомиться с основами проектирования печатных плат с необходимостью учитывать поведение электромагнитных полей [10], а также пройти шестичасовой курс «Перспектива разработки цифровых печатных плат» [11].

Автор перевода в свою очередь рекомендует посетить сайт Кеннета Уайтта для получения дополнительной технической информации, расписаний обучения и полезных ссылок [12], а также обращает внимание читателей на два выпуска специализированного сборника по вопросам ЭМС [15, 16]. В рекомендованных сборниках вы найдете не только теоретические статьи и статьи по общим проблемам ЭМС и ЭМП (в них доступна вся серия статей по ссылке [1, 7]), но и рекомендации по анализу рисков, выбору элементов и материалов и много другой полезной информации. ■

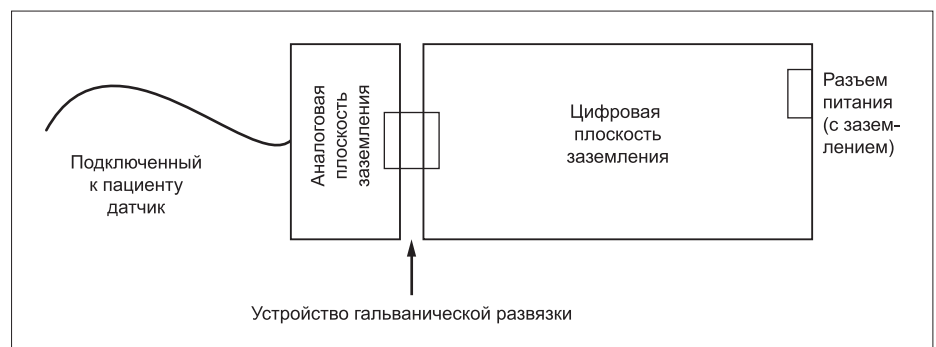


Рис. 7. Типичная конфигурация для решения заземления для платы монитора, подключенного к пациенту

## Литература

1. Рентюк В. Электромагнитная совместимость: проблема, от решения которой не уйти // Компоненты и технологии. 2017. № 7.
2. Уайтт К. Особенности конструирования печатных плат с выполнением требований по ЭМС // Компоненты и технологии. 2019. № 6.
3. Wyatt K. Design PCBs for EMI, part 4: More on partitioning. <https://www.edn.com/design-pcbs-for-emi-part-4-more-on-partitioning/>
4. Wyatt K. Design PCBs for EMI, part 3: Partitioning and routing. <https://www.edn.com/design-pcbs-for-emi-part-3-partitioning-and-routing/>
5. Рентюк В. Краткий путеводитель по беспроводным технологиям «Интернета вещей». Часть 1. Сети, шлюзы, облака и протоколы // Control Engineering Россия. 2017. № 6.
6. Бейлис А.-М. Безопасное использование DC/DC-преобразователей: требования третьей редакции стандарта IEC 60601-1 // Компоненты и технологии. 2015. № 11.
7. Ле Февр П. Электропитание и проблемы электромагнитной совместимости оборудования при работе в медицинских средах // Компоненты и технологии. 2016. № 5.
8. Джадус Б. Изолированные интерфейсы µModule от Linear Technology // Компоненты и технологии. 2017. № 10.
9. Beeker D. Effective PCB Design: Techniques to Improve Performance. [www.nxp.com/files-static/training\\_pdf/WBNR\\_PCBDESIGN.pdf](http://www.nxp.com/files-static/training_pdf/WBNR_PCBDESIGN.pdf)
10. Hartley R. Bringing two-day workshops on design and assembly to you! [www.pcb2day.com/](http://www.pcb2day.com/)
11. Morrison R. Welcome to Perfect the First Time: A Field Perspective on Digital Circuit Board Design, a 6-hour course for all circuit designers. [www.ralphmorrison.com/](http://www.ralphmorrison.com/)
12. Wyatt K. Having Trouble Getting Your Product To Meet EMC Requirements? [www.emc-seminars.com/](http://www.emc-seminars.com/)
13. Рентюк В. Краткий путеводитель по беспроводным технологиям «Интернета вещей». Часть 4. Большой радиус действия // Control Engineering Россия. 2018. № 3.
14. Электромагнитная совместимость в электронике — 2018. Сборник. [www.emc-e.ru/magazine/emc-2018/](http://www.emc-e.ru/magazine/emc-2018/)
15. Электромагнитная совместимость в электронике — 2019. Сборник. [www.emc-e.ru/magazine/emc-2019/](http://www.emc-e.ru/magazine/emc-2019/)

Статья опубликована в журнале «Компоненты и технологии» № 03'2020