

Уменьшение эффекта «плавающей» земли

при проектировании DC/DC-преобразователей

Джеф Барроу
(Jeff Barrow)

Перевод: Сергей Белых

sergey.belyh@eltech.spb.ru

Каждый инженер при разработке электронного прибора хотя бы один раз сталкивался с плохой работой потенциально правильно спроектированного устройства. Связано это с тем, что моделирование устройства в виде принципиальной электрической схемы отличается от его реального воплощения на печатной плате. Особое внимание в данном случае требуется уделять разводке шин питания и общего провода (земли).

Эта задача наиболее актуальна при разработке понижающих и повышающих DC/DC-преобразователей, через общий провод которых постоянно протекают большие быстроизменяющиеся токи, что приводит к электромагнитным помехам (ЭМП) и сбоям во время работы системы. Из-за сложности теоретического анализа таких процессов для минимизации паразитных воздействий часто приходится полагаться на знание физики шума и собственную интуицию.

«Плавающая» земля может порождать переходные процессы с амплитудой до нескольких вольт. Чаще всего причиной этого является изменение магнитного потока. Замкнутая электрическая цепь с протекающим по ней током, по сути, является электромагнитом с напряженностью поля, пропорциональной этому току. Магнитный поток пропорционален магнитному полю, проходящему через площадь, ограниченную длиной электрической петли

$$\text{магнитный поток} \propto \text{магнитное поле} \times \text{площадь петли},$$

или, более точно,

$$\Phi_B = BA \times \cos \varphi,$$

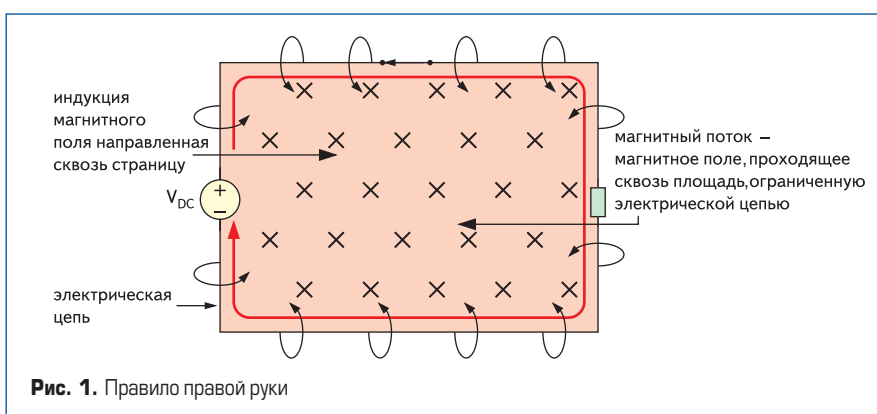


Рис. 1. Правило правой руки

где Φ_B — магнитный поток; B — магнитная индукция; A — площадь замкнутой электрической цепи, а φ — угол между вектором B и нормалью к поверхности, ограниченной длиной электрической цепи.

Рис. 1 иллюстрирует связь между магнитным потоком и протекающим электрическим током. Источник постоянного напряжения, нагруженный на резистор, обеспечивает протекание электрического тока, сила которого определяется по закону Ома. Этот ток образует вокруг себя магнитное поле с вектором магнитной индукции, направление которого определяется по правилу правой руки. Замкнутая электрическая цепь образует поток вектора магнитной индукции сквозь площадь, которую она ограничивает.

Измените либо силу магнитного поля, либо длину электрической цепи, и магнитный поток изменится. Переменный магнитный поток приводит к возникновению разности потенциалов на проводах, соединяющих электронные компоненты. Величина этого напряжения будет пропорциональна скорости изменения магнитного потока $d\Phi_B/dt$. Заметьте, что изменение магнитного потока может вызвать как изменение протекающего тока при фиксированной длине цепи, так и изменение длины цепи при постоянном токе.

Предположим, например, что выключатель на рис. 2 внезапно разомкнули. Это приведет к прекращению протекания электрического тока и исчезновению магнитного потока, что, в свою очередь, вызовет кратковременное возникновение большого напряжения на концах проводов. Наибольшую актуальность данная проблема представляет для протяженных проводов цепи, т. е. для общего провода. В результате на тех частях провода, который соединяет «земляные» выводы компонентов, появится напряжение, и потенциал общего провода на нагрузке будет отличаться от по-

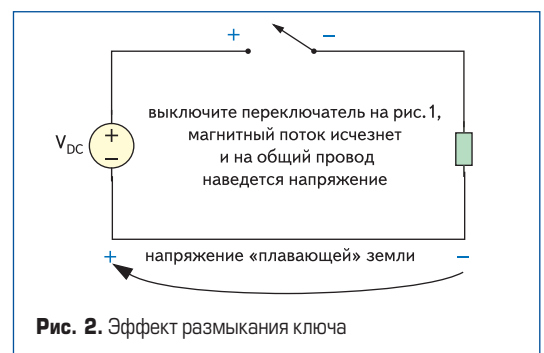


Рис. 2. Эффект размыкания ключа

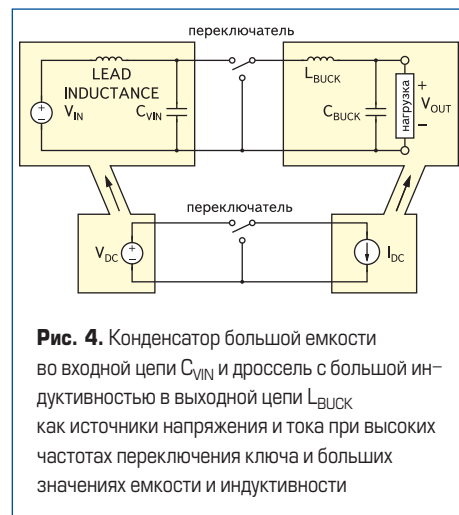
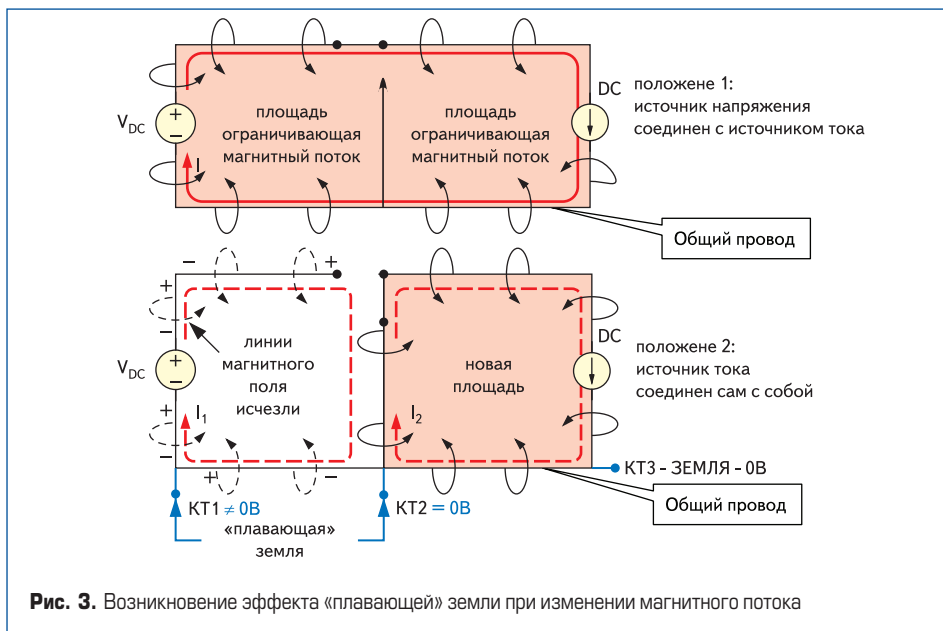


Рис. 4. Конденсатор большой емкости во входной цепи C_{VIN} и дроссель с большой индуктивностью в выходной цепи L_{BUCK} как источники напряжения и тока при высоких частотах переключения ключа и больших значениях емкости и индуктивности

тенциала общего провода на входе цепи, и наоборот. Данная ситуация будет вызывать ложные сигналы и сбои в работе схемы.

К другим источникам возникновения эффекта «плавающей» земли относят падение напряжения на сопротивлении дорожек печатной платы и переходные процессы в паразитных емкостях.

Вообще, падение напряжения на сопротивлении печатной платы — не основной источник эффекта «плавающей» земли. Медь толщиной 35 микрон обладает удельным сопротивлением 500 мкОм/квадрат, таким образом, изменение тока на 1 А приводит к падению напряжения 500 мкВ/квадрат, что оказывает существенное влияние только на узкие, длинные и разветвленные линии общего провода и на прецизионные электронные схемы.

Процесс заряда и разряда паразитных емкостей приводит к возникновению больших переходных токов в общем проводе. Изменение магнитного потока, вызванного этими токами, приводит к возникновению эффекта «плавающей» земли.

Наилучшим способом снижения эффекта «плавающей» земли в импульсных DC/DC-преобразователях является контроль изменений магнитного потока путем минимизации площади токовой петли и изменений в этой площади.

В некоторых случаях, как на рис. 3, ток остается постоянным, но переключение ключа приводит к изменению площади электрической цепи, следовательно, изменяется магнитный по-

ток. В положении 1 переключателя идеальный источник напряжения соединен идеальными проводами с идеальным источником тока. Ток, протекающий в цепи, проходит через общий провод.

В положении 2 переключателя тот же самый ток протекает по другой цепи. Ток источника не изменяется, но площадь электрической петли изменилась. Изменение площади петли приводит к изменению магнитного потока и наведению напряжения. Так как общий провод является частью этого изменения петли, напряжение на нем будет плавать.

Эффект «плавающей» земли в понижающих DC/DC-преобразователях

Для облегчения понимания электрическую схему на рис. 3 можно превратить в схему понижающего DC/DC-преобразователя (см. рис. 4).

На высоких частотах C_{VIN} можно приблизительно представить как источник постоянного напряжения, а L_{BUCK} — как источник постоянного тока. Эти допущения сделаны для удобства понимания процессов, происходящих в преобразователях.

На рис. 5 показано, как магнитный поток изменяется при переключении ключа.

Большая индуктивность L_{BUCK} поддерживает выходной ток примерно постоянным. Аналогично, C_{VIN} поддерживает напряжение примерно равным V_{IN} , так что входной ток тоже

является более-менее постоянным благодаря неизменяемому напряжению на индуктивности входных проводников.

Хотя входной и выходной токи примерно постоянны, при переключении ключа из положения 1 в положение 2 происходит изменение площади активной электрической цепи на величину среднего участка. Это вызывает изменение магнитного потока, который, в свою очередь, генерирует разность потенциалов на среднем участке общего провода.

На практике в понижающих преобразователях переключатель заменяется парой полупроводниковых компонентов, как показано на рис. 6. Из иллюстрации видно, что как бы мы ни усложняли схему, интуитивный подход нас не подводит.

Фактически изменение магнитного потока вызовет появление разности потенциалов на всех участках общего провода. Тогда возникает интересный вопрос: «Где истинный потенциал земли?» Поскольку эффект «плавающей» земли означает увеличение напряжения на общем проводе схемы относительно некоторой идеальной точки, называемой «истинной» землей, эту точку необходимо идентифицировать.

В нашем случае целесообразно в качестве «истинной» земли выбрать точку подсоединения нагрузки к общему проводу схемы. В конце концов главная задача любого DC/DC-преобразователя обеспечивать стабильное напряжение и ток в нагрузке. Потенциал всех других точек общего провода будем отсчитывать относительно «истинной» земли.

Таким образом, определив точку расположения «истинной» земли в нашей электрической цепи, мы можем приступить к умень-

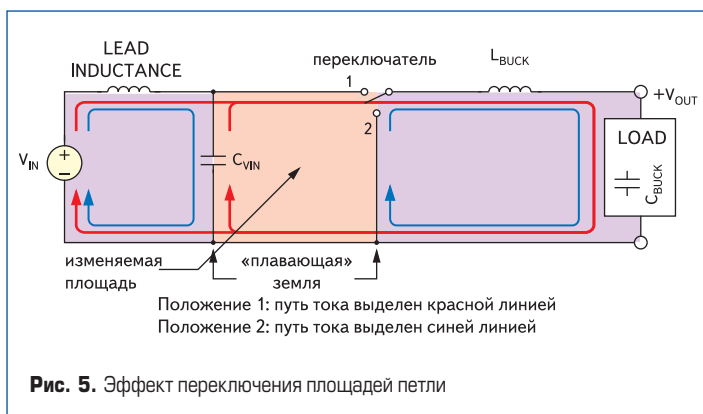


Рис. 5. Эффект переключения площадей петли

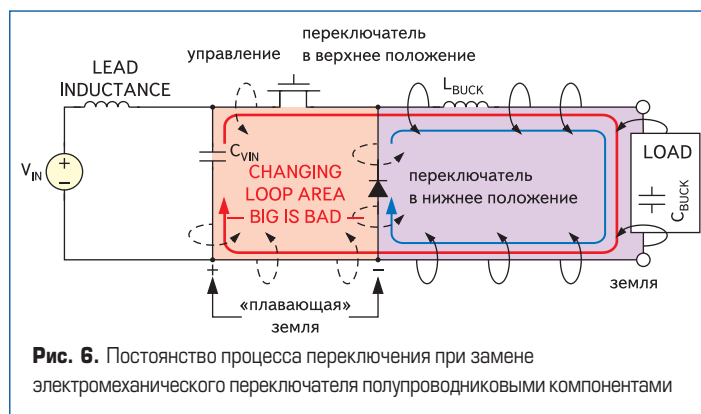


Рис. 6. Постоянство процесса переключения при замене электромеханического переключателя полупроводниковыми компонентами

шению рассматриваемого эффекта. Как показано на рис. 7, для этого необходимо минимизировать площадь цепи, ограниченную конденсатором C_{VIN} и переключателем, то есть длину электрической связи конденсатора и переключателя на печатной плате, в том числе максимально близко располагать эти элементы друг к другу.

Общий вывод конденсатора соединяется непосредственно с общим выводом ключа и с точкой «истинной» земли. Это приводит к отсутствию провода, на который может наводиться напряжение при переключении ключа. Поэтому эффект «плавающей» земли отсутствует.

Рис. 8 иллюстрирует практическую реализацию понижающего преобразователя (рис. 6) на печатной плате. В положении переключателя 1, т. е. при открытом транзисторе, путь протекания постоянного тока показан красной линией. В положении переключателя 2, то есть закрытом транзисторе и открытом диоде, путь протекания тока показан синей линией. Заметьте, что при этом изменяется площадь

цепи и, следовательно, магнитный поток. Так появляется эффект «плавающей» земли.

Реализация нашего проекта в виде односторонней печатной платы показана для большей ясности понимания рассматриваемых процессов. Для подавления паразитного напряжения на общем проводе целесообразнее использовать двустороннюю печатную плату (см. рис. 9).

Двусторонняя плата сконструирована так, что входной конденсатор расположен на вернем слое под прямым углом к дорожке питания. Общий провод выполнен в виде сплошного участка фольги на нижнем слое платы (левая часть рис. 9). Электрический ток проходит по верхнему слою платы через конденсатор и переходное отверстие на общий провод нижней стороны платы.

Поскольку переменный ток всегда проходит по участку наименьшего сопротивления, т. е. преодолевает минимальный путь, то он, протекая по общей шине, будет скруглять угол, возвращаясь к источнику. В результате магнитное поле тока и связанная с ним площадь цепи при изменении амплитуды или частоты тока

вызовет появление магнитного потока, следовательно, и напряжения «плавающей» земли.

В правой части рисунка представлен откорректированный слой общего провода, который ликвидирует площадь, ограничиваемую протекающим током. Для этого часть фольги «земляного» слоя вырезана, так что пути, проходимые током по верхней и нижней стороне платы, совпадают, и любое паразитное напряжение, созданное в выделенном общем проводе, изолировано от общей шины «земли».

В печатной плате на рис. 10 используется принцип, показанный на рис. 9, для уменьшения паразитных напряжений. Входной конденсатор и переключатель располагаются на островке, вырезанном в общем «земляном» слое.

Данная конфигурация слоя «земли» не оптимальна, но хорошо работает и показывает основной принцип проектирования подобных устройств. Длина пути электрического тока в обоих положениях переключателя (синяя и красная линии) примерно одинакова. Минимальная разница означает минималь-

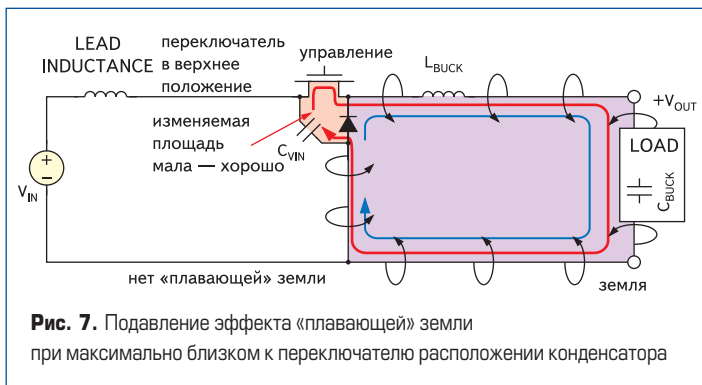


Рис. 7. Подавление эффекта «плавающей» земли при максимально близком к переключателю расположении конденсатора

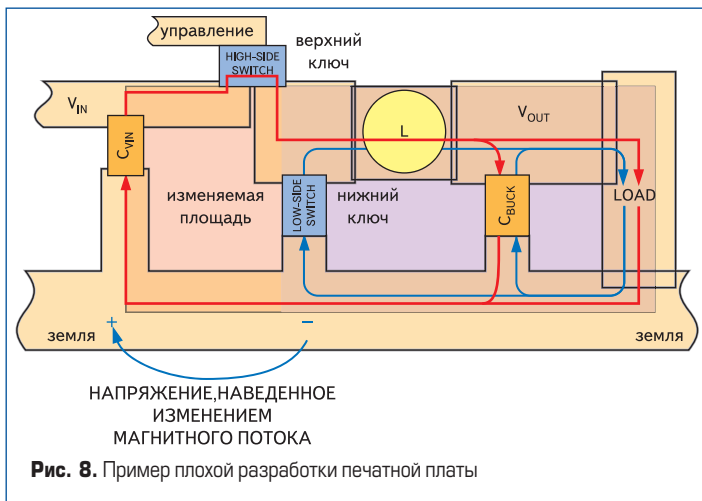


Рис. 8. Пример плохой разработки печатной платы

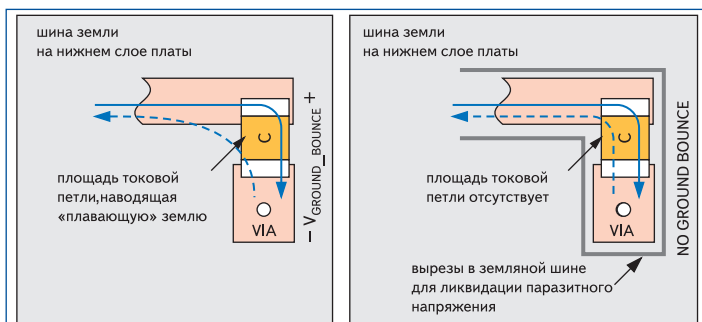


Рис. 9. Результат применения сплошного слоя «земли» (не лучший вариант)

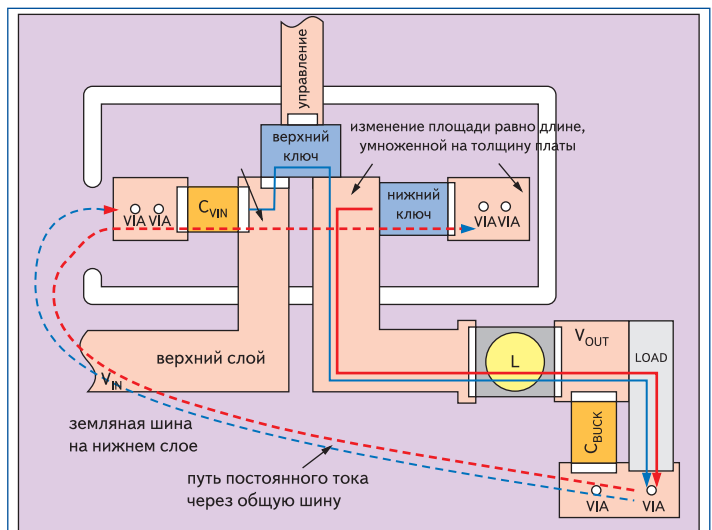


Рис. 10. Правильно разработанный «земляной» слой с минимальными отличиями в путях протекания тока

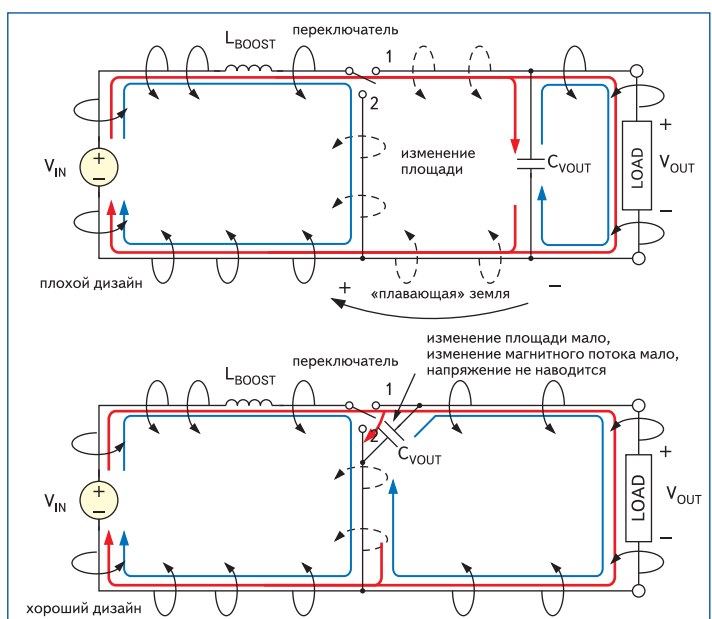


Рис. 11. Проектирование повышающего преобразователя

ное изменение магнитного потока, а значит, и минимальное напряжение, наводимое эффектом «плавающей» земли. (Обычно, однако, рекомендуется поддерживать площадь петли как можно меньше, указанный рисунок только иллюстрирует важность подбора путей протекания переменного тока.)

Кроме того, на островке возврата к «земле», где магнитные поля и площадь петли изменяются, любой скачок потенциала ограничен вырезом.

Интересно, что, на первый взгляд, входной конденсатор C_{VIN} не расположен между входом верхнего ключа и нижним полюсом нижнего ключа так, как показано на рис. 7, но при более пристальном рассмотрении можно убедиться, что это именно так. Хотя физическое соседство и хорошо, но электрическая близость, которая достигается уменьшением площади петли, важнее.

Эффект «плавающей» земли в повышающих DC/DC-преобразователях

Повышающий преобразователь, по сути, является зеркальным отражением понижающего преобразователя. Для превращения перехода понижающего преобразователя в повышающий необходимо изменить подключение в схему конденсатора, дросселя и переключателя (см. рис. 11).

Согласно изложенному выше принципу (по аналогии с понижающим DC/DC-преобразо-

вателем), следует минимизировать площадь электрической цепи, ограниченную конденсатором C_{VOUT} и переключателем, для снижения эффекта «плавающей» земли.

Справка

Эффект «плавающей» земли в основном вызывается изменением магнитного потока. В DC/DC-преобразователях сам принцип преобразования: постоянный ток — переменный ток — постоянный ток предполагает высокоскоростное переключение входных и выходных цепей между собой, что приводит к изменению площади активной электрической цепи и наводке паразитного напряжения «плавающей» земли на выход.

Но правильное размещение входного/выходного конденсатора и правильное проектирование «земляного» слоя позволяет изолировать выход от этой наводки.

Кроме того, правильное расположение слоев печатной платы гарантирует, что точка «истинной» земли будет находиться в месте соединения вывода нагрузки с общим проводом без учета изменяющихся площадей цепи и токов.

Полезные советы

В этом разделе будут рассмотрены некоторые моменты, учет которых при проектировании электронных устройств позволит избежать проблем, связанных с эффектом «плавающей» зем-

ли. На рис. 12 показано, что магнитные поля проводников с током, пересекающихся между собой под прямым углом, не взаимодействуют.

Линии магнитного поля вокруг параллельных проводников с одинаковыми токами, протекающими в одном направлении, взаимно компенсируются между проводниками и складываются за ними. Следовательно, чем шире дорожки на печатной плате, тем меньшей индуктивностью они обладают (рис. 13).

Линии магнитного поля вокруг параллельных проводников с одинаковыми токами, протекающими в противоположных направлениях, взаимно компенсируются вне проводников и складываются между ними. Следовательно, уменьшение площади электрической цепи приведет к уменьшению магнитного потока и индуктивности. Этот факт объясняет, почему путь протекания обратного переменного электрического тока по нижней стороне платы всегда проходит под путем протекания тока по верхней стороне платы (рис. 14).

Рис. 15 показывает, почему углы увеличивают индуктивность. Прямой проводник чувствует только собственное магнитное поле, но в углу он начинает чувствовать еще и поле от своего изогнутого участка. Таким образом, магнитное поле в месте перегиба проводника увеличивается, и возрастает его индуктивность.

На рис. 16 показано, что отсутствие под дорожкой части «земляного» слоя приводит к увеличению магнитного потока и появлению эффекта «плавающей» земли.

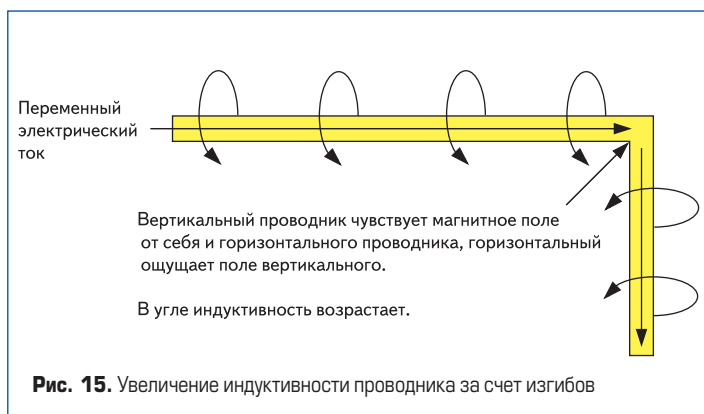
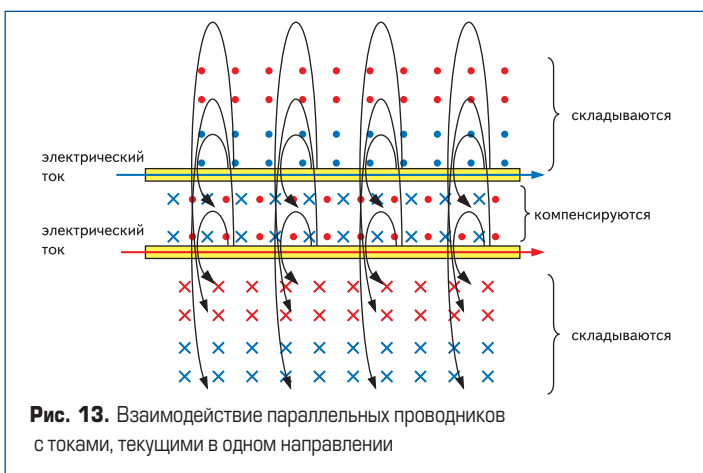
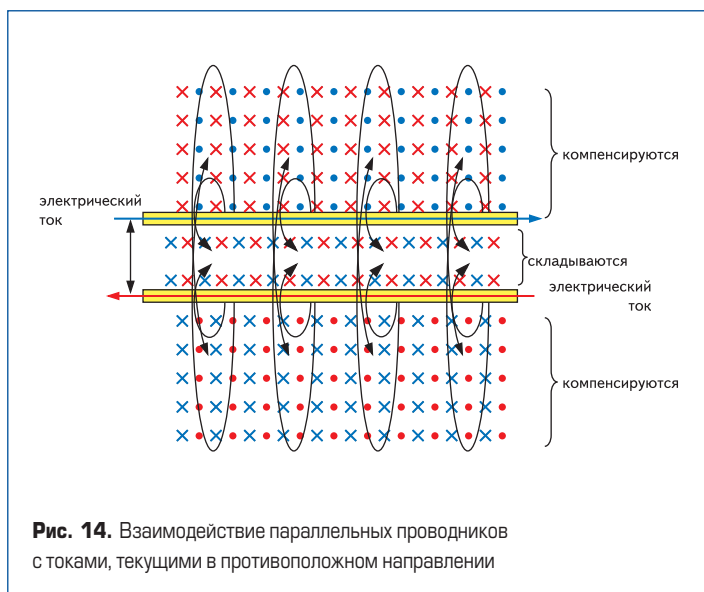
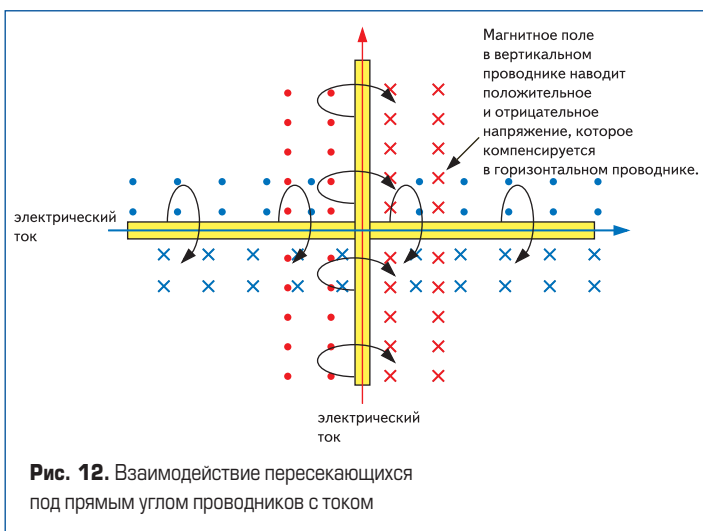




Рис. 16. Протекание тока по пути минимального сопротивления

Влияние ориентации компонента на эффект «плавающей» земли приведен на рис. 17.

Резюме

Эффект «плавающей» земли представляет проблему практически для всех видов электронных приборов. Например, на мониторе или телевизоре он может вызвать зашумленное изображение, в аудиоустройствах — фоновый шум. В цифровых системах могут наблюдаться даже ошибки в вычислениях, что может привести к катастрофическим последствиям.

Интуитивный подход и детальное моделирование паразитных элементов при проектировании печатной платы позволят свести к ну-

лю влияние «плавающей» земли на параметры цепи.

При разработке печатной платы сначала выбирайте точку «истинной» земли в том месте, к которому будете подключать нагрузку. Затем упростите динамику электрической цепи, замените конденсаторы и дроссели источниками напряжения и тока. Ищите площади, ограниченные протекающим током, и минимизируйте их в каждом состоянии схемы. Обеспечьте одинаковую длину пути, преодолеваемую током в каждом состоянии схемы.

В большинстве случаев данные меры приведут к приемлемому результату. Если этого недостаточно, оптимизируйте сопротивление «земляного» слоя и пути перезаряда паразит-

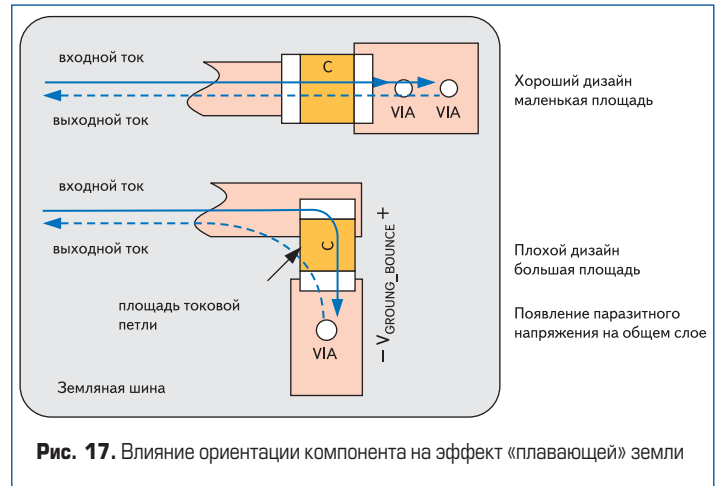


Рис. 17. Влияние ориентации компонента на эффект «плавающей» земли

ных конденсаторов через все ключи и вниз к пути протекания возвратного тока.

Независимо от сложности схемы базовые принципы возникновения рассматриваемого эффекта не изменяются — изменения магнитного потока должны быть минимизированы или изолированы.

Литература

1. Analog Dialogue. Vol. 23. N 3. P. 7–9; Vol. 11. N 2. P. 10–15; Vol. 25. N 2. P. 24–25; Vol. 26. N 2. P. 27; Vol. 30. N 2. P. 11; Vol. 39. N 3. P. 3–8. Номера доступны на web-сайте компании Analog Device.
2. Barrow J. Reducing Ground Bounce in DC/DC-Converter Applications. — EDN, 7/6/2006.