

ЧТО НУЖНО ЗНАТЬ ДЛЯ УСПЕШНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

СЕРГЕЙ КРАСНОВ, инженер

В статье рассматриваются некоторые важные вопросы проектирования двухслойных печатных плат, и даются проверенные практикой рекомендации. Кроме того, обсуждаются особенности анализа схем с сосредоточенными и распределенными элементами.

Многие потребительские изделия, микроконтроллеры и IoT-приложения построены на двухслойных печатных платах. Возможности двухслойной печатной платы ограничены – как правило, на ней трудно осуществить разводку BGA-корпуса ПЛИС или выводов современного микроконтроллера. В этой статье мы обсудим правила проектирования для плат не самого высокого уровня.

На рисунке 1 в качестве примера двухслойной печатной платы показана Arduino Uno – платформа для разработки на базе микроконтроллера ATmega.

Arduino Uno очень «живуча» – она всегда заработает, каким бы правилом проектирования вы ни воспользовались, что, к сожалению, расхолаживает разработчиков. Можно смело утверждать, что разработка на основе Arduino являет собой образец того, как не следует проектировать, чтобы затем не переделывать схему.

ДВЕ ПРОБЛЕМЫ, КОТОРЫЕ НЕОБХОДИМО ИЗБЕЖАТЬ

Схема определяет лишь используемые в ней компоненты и способ их соединения, но не позволяет установить целостность сигнала или питания.

Межсоединения могут ухудшить рабочие характеристики изделия. К наиболее частым и сложным проблемам целостности сигналов и питания относятся перекрестные помехи, обусловленные взаимной индуктивностью между контурами сигнала и обратного тракта (помехи по земле) и коммутационный шум на шинах питания, вызванный в переходных процессах током большой амплитуды. На рисунке 2 показан результат измерения помехи по земле платы Arduino Uno при одновременном включении и выключении нескольких выходных каскадов цифровых микросхем.

При физическом проектировании платы, включающем создание топологии, необходимо соблюдать основные правила проектирования, чтобы

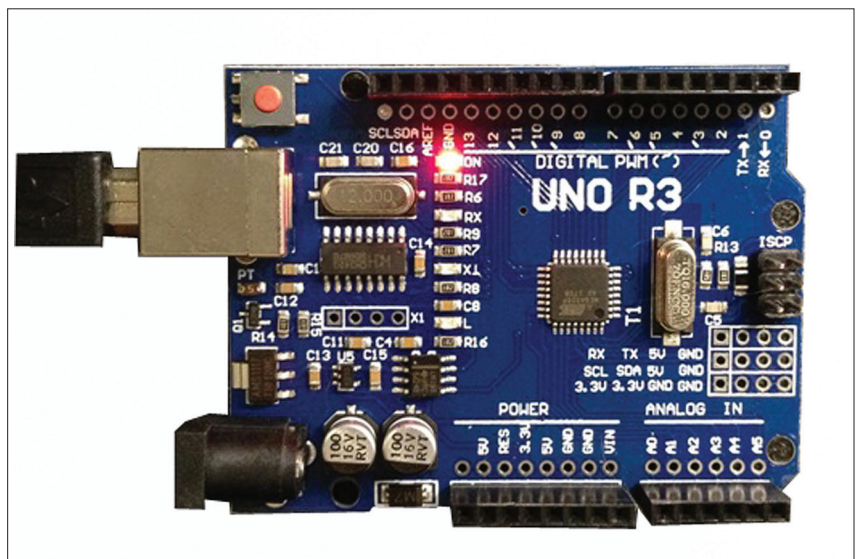


Рис. 1. Пример недорогой печатной платы Arduino Uno

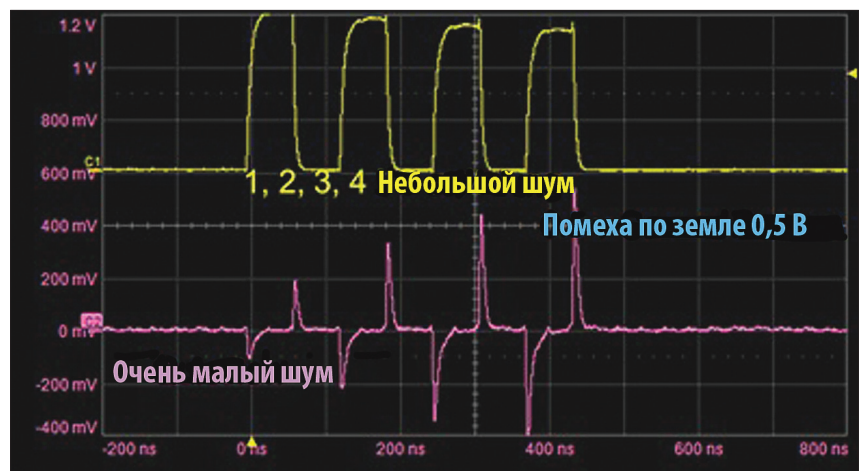


Рис. 2. Результаты измерения помехи по земле на плате Arduino Uno при замыкании и размыкании нескольких ключей

уменьшить влияние этих двух проблем. Без тщательного анализа, который должен выполнять каждый инженер, можно только следовать некоторым общим рекомендациям, позволяющим уменьшить риск появления указанных проблем. Мы рассмотрим несколько рекомендаций, которые не гарантируют полный успех, но позволяют снизить риски возникновения отказов.

Совет 1. Ширина сигнального проводника должна быть равной 6 мил, ширина питающих проводников – 20 мил, а диаметр отверстий – 13 мил.

Указанные размеры являются минимальными, и их может реализовать любой производитель при наименьшей цене. Выбор самых узких элементов обеспечивает самую высокую плот-

ность трассировки. Проводник шириной 1 мил (0,25 мм) проводит постоянный ток величиной 1 А; при этом его температура заметно не повышается. Сопротивление такого проводника составляет 80 мОм/дюйм при толщине медного покрытия с удельной массой 1 унция/кв. фут. В большинстве приложений сопротивление проводника печатной платы является приемлемым, даже если его величина составляет 1 Ом. Поскольку длина рассматриваемого сигнального проводника составляет 12 дюймов, потери не играют существенной роли, пока ширина полосы пропускания не превысит 1 ГГц.

Характеристический импеданс проводника шириной 6 мил при использовании стандартной двухслойной платы толщиной 62 мил достигает 150 Ом. Если длительность фронта достаточно мала или длина межсоединений настолько велика, что требуется согласование нагрузки, ее так же легко реализовать для 150-Ом проводников, как и в случае с 50-Ом проводниками, если проводники не выходят за пределы платы. При этом рассеяние мощности меньше, чем в случае с 50-Ом проводниками.

Попробуем установить, насколько большой ток может проходить по проводнику печатной платы, показанной на рисунке 3.

По проводнику шириной 20 мил в медном покрытии с удельной массой 1 унция/кв. фут может проходить постоянный ток величиной 3 А, не вызывая заметного повышения температуры. Последовательное сопротивление такого проводника составляет около 25 мОм/дюйм. Сопротивление силового проводника длиной 4 дюйма равно 0,1 Ом, что, как правило, считается незначительной величиной. Если требуется, чтобы по проводникам протекал ток до 10 А, их ширину следует увеличить до 100 мил.

Совет 2. Располагайте компоненты, сигнальные и силовые тракты на слое 1, а обратный заземляющий тракт – на слое 2.

Длину проводника, под которым имеется обратный тракт, можно выбрать сколь угодно большой, не ухудшив рабочие характеристики. Главное – использовать непрерывный обратный тракт под сигнальной линией. Проще всего это сделать, задействовав сплошной заземляющий нижний слой платы.

Таким образом, верхний слой будет отведен под размещение всех компонентов, сигнального и силового трактов, что облегчит последующую отладку при проверке сигнальных проводников. Кроме того, появляется возможность отличить сигнальные

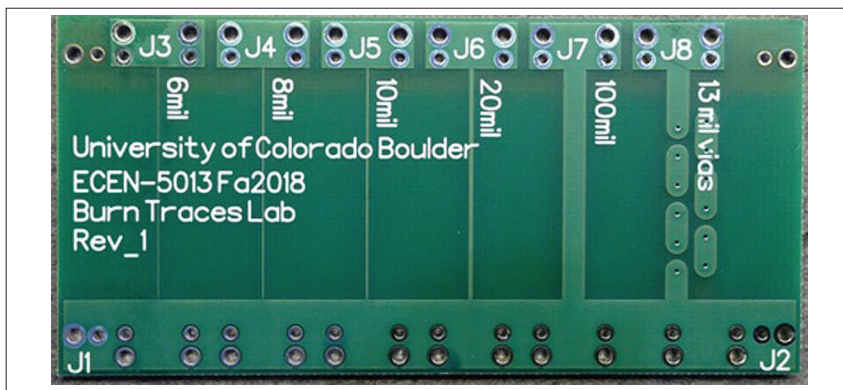


Рис. 3. Образец испытательной платы для определения максимального тока, который могут пропускать проводники разной толщины

проводники от проводников питания по ширине линий.

Совет 3. Размещайте компоненты и сигнальные проводники подальше друг от друга.

Старайтесь размещать сигнальные проводники как можно дальше друг от друга во избежание перекрестных помех. У этих проводников – достаточно большой характеристический импеданс. Поскольку они находятся далеко от слоя с обратным током, между ними возникают перекрестные помехи. Чем меньше расстояние между соседними сигналами, тем эти помехи больше: например, при минимальном интервале перекрестная помеха на ближнем конце достигает 25%.

Совет 4. Изоляционный промежуток для сигнальной линии на заземляющем слое должен быть узким. В противном случае в верхнем слое над зазором устанавливается перемычка.

При проектировании печатной платы следует стремиться к тому, чтобы импеданс обратного тракта каждой сигнальной линии был настолько мал, чтобы обеспечить низкую взаимную индуктивность между соседними парами обратных трактов. При трассировке сигнальной линии по заземляющему слою приходится создавать вокруг нее изоляционный промежуток. Сигнальные проводники, проходящие над этим зазором в обратном тракте, генерируют

перекрестные помехи, распространяющиеся на другие сигналы, которые пересекают зазор.

Чтобы минимизировать помехи, следует делать зазоры небольшими, сузив, таким образом, тракт обратного тока. Если же этот зазор велик, в верхний слой добавляется обратный тракт, проходящий над зазором. На рисунке 4 приводятся примеры расположения зазоров в местах их пересечения с проводниками; для обратного тока в верхнем слое установлены перемычки.

Совет 5. Устанавливайте развязывающие конденсаторы как можно ближе к выводу питания ИС так, чтобы по возможности минимизировать индуктивный контур.

Рекомендуется использовать конденсатор в малом корпусе, выбрав максимальную емкость для этого типоразмера с номинальным напряжением, которое, по меньшей мере, в два раза больше предполагаемого напряжения шины питания. Как правило, в таких случаях применяется многослойный керамический конденсатор емкости 22 мкФ. Величина его емкости зависит от тока, потребляемого развязываемыми компонентами. Согласно известному эмпирическому правилу, емкость 22 мкФ «справится» с током величиной 22 мА в переходном процесс при минимальном провале напряжения.

Величина емкости не так важна, как минимизация индуктивных контуров

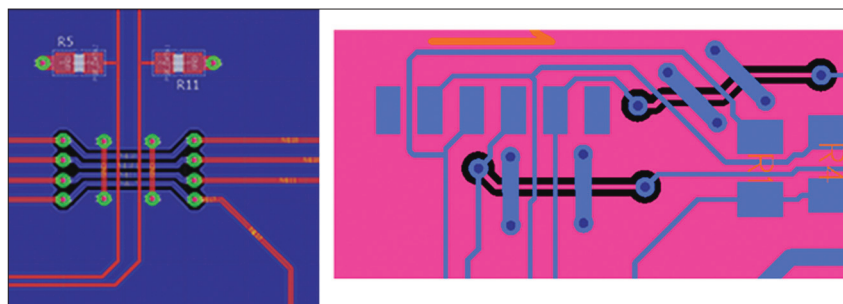


Рис. 4. При пересечениях зазоров и проводников используются перемычки для прохождения обратного тока над зазорами

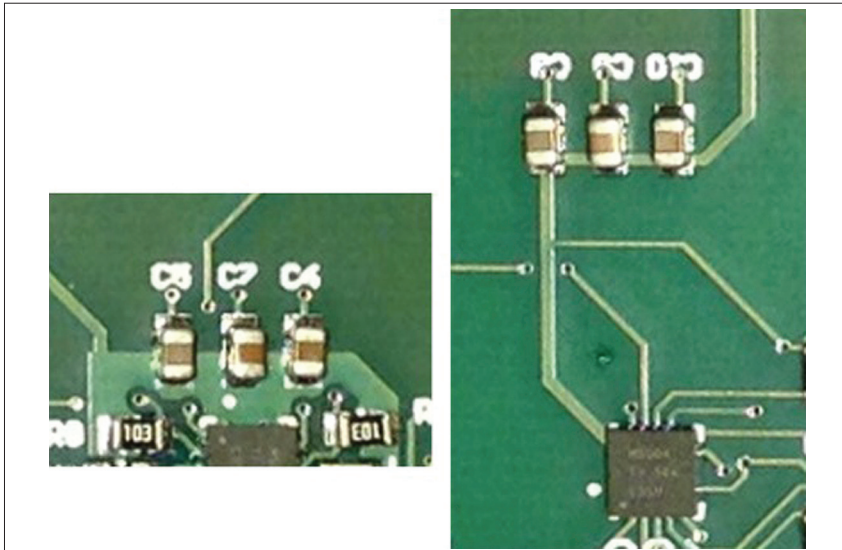


Рис. 5. Пример: а) корректного и б) некорректного размещения развязывающих конденсаторов на печатной плате

между выводами питания и земли ИС и развязывающими конденсаторами. Как правило, с этой целью конденсаторы, установленные как можно ближе к выводам микросхемы, используют короткие широкие проводники силового и заземляющего трактов. На рисунке 5 приведен пример корректного и некорректного использования нескольких конденсаторов в соответствии с этой рекомендацией.

Совет 6. На всех разъемах по возможности назначайте один обратный тракт каждому цифровому сигналу.

Помехи по земле или коммутационный шум создают несколько сигналов, которые совместно используют один вывод для обратного тока. У многих разъемов – только один или два таких вывода с множеством переключающихся сигналов, в результате чего возникает помеха по земле. Например, у одного заземляющего вывода разъема платы Arduino – 13 цифровых вводов/выводов, которые могут переключаться.

Совет 7. Не следуйте двум известным рекомендациям.

К первой из них относится запрет на использование конденсаторов с разными емкостями 10 мкФ, 1 мкФ и 0,1 мкФ на каждом выводе питания. Мало того, что такое ограничение ничего не дает – в некоторых случаях из-за него возникают дополнительные проблемы. Если на плате имеется место для трех конденсаторов, установите их так, чтобы минимизировать контур индуктивности.

Вторая рекомендация – никогда не использовать медную заливку. Такое ограничение тоже неэффективно и иногда создает ненужные проблемы. Вместо медной заливки используйте про-

водники для слоя питания. Таким образом можно отслеживать силовые тракты при проверке подключений и отладке. Требование к обеспечению минимального контура индуктивности относится ко всем соответствующим компонентам, начиная с ИС и заканчивая развязывающими конденсаторами. Например, для тока величиной 10 А достаточно, чтобы ширина проводника составляла всего 100 мил.

Что касается заливки для заземления, то для него рекомендуется использовать нижний слой платы с обратными трактами. В случае использования верхней медной заливки в качестве заземления может незаметно произойти разрыв импеданса в обратном тракте.

Не следует думать, что добавление медной заливки, подключенной к заземляющему слою, позволяет уменьшить перекрестные помехи – для их минимизации достаточно обеспечить

непрерывные обратные тракты, не перекрывающие друг друга. Медная заливка большой площади между сигнальными проводниками часто становится причиной увеличения перекрестной помехи.

ВЫВОДЫ

Следование этим практическим рекомендациям не гарантирует успеха, но позволяет уменьшить риск возникновения отказа из-за перекрестной помехи или шума на шине питания.

В качестве примера следования этим советам на рисунке 6 представлена двухслойная плата Arduino с установленным микроконтроллером ATmega 32U4. Из этого рисунка видно, что в схеме реализованы все упомянутые рекомендации:

1. Ширина сигнальных проводников равна 6 мил, проводников питания – 20 мил, а диаметр сигнальных переходных отверстий – 13 мил.
2. На слое 1 (обозначен красным цветом) находятся компоненты, сигнальные и силовые проводники. На слое 2 (синим цветом) находится сплошной заземляющий слой.
3. Расстояние между сигнальными проводниками достаточно велико.
4. Ширина зазоров у сигнальных проводников в заземляющем слое минимальная. Если же она велика, используются перемычки для обратного тока.
5. Развязывающие конденсаторы располагаются рядом с силовыми выводами, которые образуют малые контуры по питанию и заземлению.
6. В стандартный разъем Arduino добавлен внешний ряд заземляющих выводов.
7. Ни на одном слое нет медной заливки, и используется только одно значение развязывающего конденсатора.

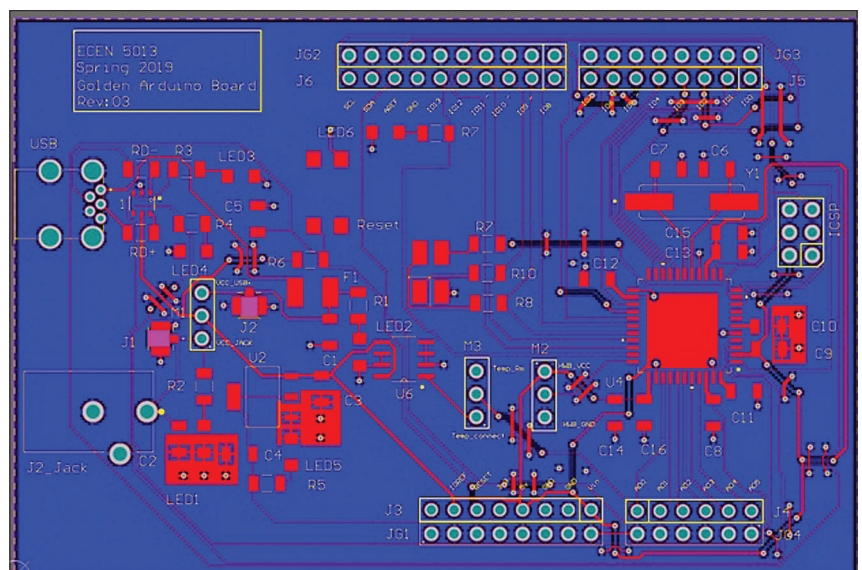


Рис. 6. Двухслойная плата Arduino с микроконтроллером ATmega 32U4, реализованная в соответствии со всеми рекомендациями

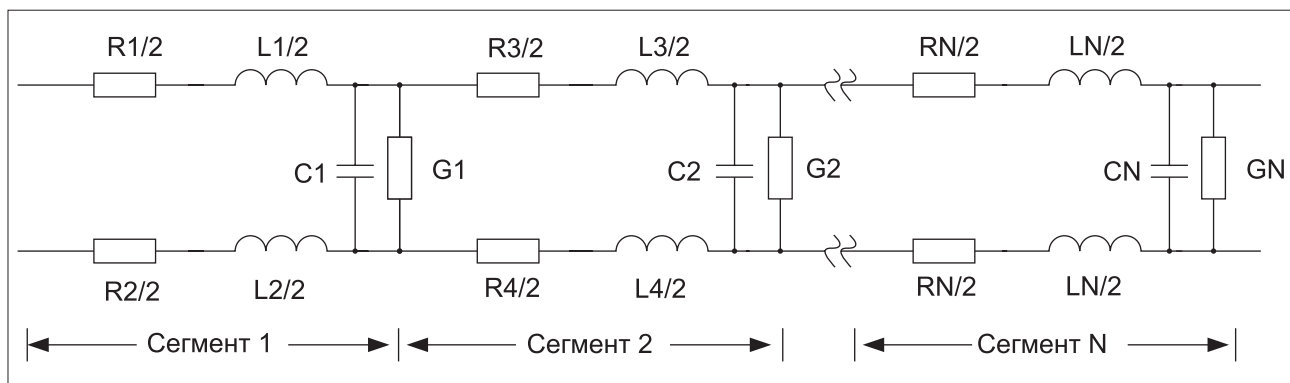


Рис. 7. Линия передачи, состоящая из сегментов с последовательными элементами R-L-C-G

МОДЕЛИ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ И РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Для проектирования двухслойных плат достаточно использовать модели схем с сосредоточенными параметрами. Это простой и удобный способ анализа. К сожалению, он не всегда годится. Рассмотрим примеры использования моделей с сосредоточенными и распределенными параметрами.

Для упрощенного анализа электронных схем применяется модель с сосредоточенными параметрами. Эта методология предполагает, что параметры схемы, к которым относятся сопротивление, емкость и индуктивность, рассматриваются как идеализированные электрические компоненты, соединенные в цепь идеально проводящими проводами. При этом физическими размерами элементов можно пренебречь и независимой переменной является только время (протекающих в них процессов). Однако на практике это не всегда так.

По мере повышения частоты импульсов и уменьшения длительности их фронтов эти элементы равномерно распределяются по подложке вдоль всей длины проводника. Медный проводник и соседствующие с ним диэлектрические материалы становятся линией передачи. Под влиянием поверхностного эффекта ВЧ-ток начинает протекать преимущественно в поверхностном слое, а на качество сигнала влияют зависящие от частоты потери. Проводник печатной платы становится распределенной системой с паразитной индуктивностью и емкостью, которая характеризуется временем задержки и рассеянными отражениями. Описываемое поведение проводника происходит в частотной области.

В [1] показано, что импеданс определяется и во временной, и в частотной областях. Во временной области полное сопротивление резистора R определяется взаимосвязью между напряжением и током (законом Ома), а идеальный

конденсатор C – взаимосвязью между запасенным зарядом и напряжением на пластине. В свою очередь, поведение индуктивности L определяется тем, как быстро изменяется во временной области ток, протекающий через дросель.

Три элемента R, L, C относятся к категории сосредоточенных компонентов схемы в том смысле, что их свойства можно локализовать в одной точке. Такой подход существенно отличается от свойств идеальной линии передачи, которая тоже состоит из этих трех элементов, но их параметры распределены равномерно по длине диэлектрического слоя. Модель с распределенными элементами применяется, если длина волны становится сопоставимой с физическими размерами схемы, что делает неприменимой модель с сосредоточенными параметрами.

Модель с распределенными элементами используется на высоких частотах, когда длина волны становится короткой. Однако она также применяется в случае очень длинных низкочастотных линий передачи, к которым, например, относятся высоковольтные сети электропитания. В этой модели тремя основными элементами являются распределенная емкость, индуктивность и проводимость (G).

Модель с сосредоточенными параметрами полностью перестает работать, если длина проводника становится больше четверти длины волны сигнала, распространяющегося по проводнику (что соответствует сдвигу фазы синусоидального сигнала на 90°). При этом не только значения, но и свойства компонентов становятся непредсказуемыми. В силу такой зависимости от длины волны модель с распределенными параметрами применяется, главным образом, на высоких частотах. Необходимо понимать, что термины «сосредоточенные» и «распределенные параметры» относятся к длине проводника относительно длины волны сигнала напряжения и токов, проходящих по проводнику.

Системы с сосредоточенными элементами описываются известными дифференциальными уравнениями, поскольку в силу малого размера этих систем (по сравнению с длиной волны) производными по координатам можно пренебречь и рассматривать только производные по времени. С другой стороны, в случае систем с распределенными параметрами требуется учитывать и производные по координатам, и производные по времени, т.е. решить частно-дифференциальные уравнения в частотной области.

Линию передачи можно представить в виде бесконечно большого числа сегментов, в состав которых входят последовательные резистивные и индуктивные, а также шунтирующие емкостные и проводящие элементы (см. рис. 7). Из-за ограниченной скорости распространения в среде сигналу «неизвестно», какая нагрузка находится в конце линии передачи – он «видит» только ее импеданс, который должен быть согласован с импедансом генератора сигналов.

КАК ФОРМИРУЕТСЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ?

Ответ на этот вопрос нельзя получить даже в Google. По идее, электрическое поле образуется, когда к выходному каскаду ИС прикладывается напряжение. При его изменении возникает всплеск тока, который порождает магнитное поле. Заключенная в сигнале электромагнитная энергия передается со скоростью около половины скорости света (из-за ограничения, обусловленного диэлектрической средой) по линии передачи вдоль проводника. Эта энергия проникает в диэлектрик и рядом расположенные элементы, создавая распределенную систему из паразитных элементов. Электромагнитные поля не ограничиваются многослойной подложкой – в отсутствие соответствующих мер по их нейтрализации излучение становится причиной помех.

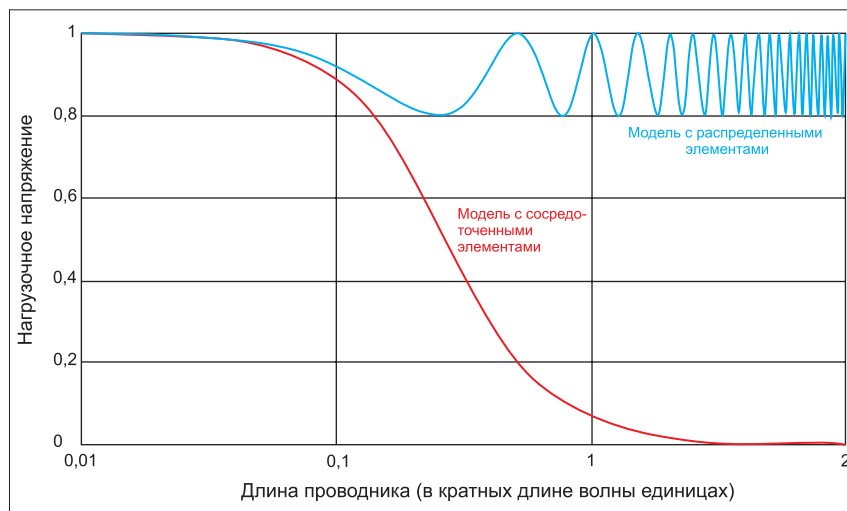


Рис. 8. Анализ сосредоточенных и распределенных элементов линии передачи

Модель системы с распределенными параметрами обеспечивает более высокую точность, но сложнее модели с сосредоточенными параметрами. Выбор модели зависит от точности каждого конкретного приложения, поскольку отсутствует четкая граница по частоте, определяющая использование той или иной модели, хотя на практике такой демаркационной областью является диапазон 100–500 МГц. Одно известное эмпирическое правило гласит, что проводники, длина которых превышает 0,1 длины волны, следует рассматривать как систему с распределенными элементами. Эта область определяется примерно тем участком, где две кривые начинают заметно расходиться (см. рис. 8).

Модель с сосредоточенными элементами применяется на сравнительно более высоких частотах в тех случаях, если устройства имеют достаточно малые размеры и изготовлены с помощью соответствующих технологий. Размеры печатных плат со сквозными металлизированными отверстиями превышают размеры эквивалентных плат, собранных с использованием технологии поверхностного монтажа. Размеры гибридных ИС, в которых пас-

сивные элементы выполнены в виде пленок на диэлектрической подложке и используются дискретные полупроводниковые электронные приборы, меньше, чем у аналогичного решения, собранного целиком из дискретных компонентов на печатной плате. Размеры монолитных ИС еще меньше. На достаточно высоких частотах микросхемы, в отличие от печатных плат, можно анализировать в виде модели с сосредоточенными параметрами. То же относится к некоторым радиочастотным устройствам.

Выбор модели анализа особенно важен в случае мобильных устройств, поскольку размеры схем с сосредоточенными элементами, как правило, становятся все меньше. Для иллюстрации разницы между сосредоточенной и распределенной моделями для линии передачи мы сравниваем их на рисунке 8, где показана зависимость напряжения нагрузки от длины линии передачи без потерь.

В зависимости от длительности фронта сигналов модель линии передачи с распределенными элементами начинает отклоняться от упрощенной модели сосредоточенных элементов в диапазоне 0,01–0,1 длины волны сигнала.

НА ЗАМЕТКУ

- В модели с сосредоточенными элементами параметры схемы определяются идеализированными электрическими компонентами, соединенными в цепь идеально проводящими проводниками. Считается, что размеры сосредоточенных элементов не влияют на происходящие в них физические процессы.
- По мере повышения частоты импульсов и уменьшения длительности их фронтов эти элементы равномерно распределяются по подложке вдоль всей длины проводника.
- Электромагнитная энергия проникает в диэлектрик и рядом расположенные элементы, создавая распределенную систему из паразитных элементов.
- На высоких частотах применяется модель с распределенными параметрами, когда длина волны становится сравнимой с физическими размерами схемы.
- Модель с сосредоточенными элементами полностью прекращает работать, если длина проводника начинает превышать четверть длины волны (что соответствует сдвигу фазы синусоидального сигнала на 90°).
- Модель системы с распределенными параметрами обеспечивает более высокую точность, но сложнее модели с сосредоточенными параметрами.
- Проводники, длина которых превышает 0,1 длины волны, следует рассматривать как систему с распределенными элементами.
- Модель с сосредоточенными элементами применяется для схем на сравнительно более высоких частотах в тех случаях, если устройства имеют достаточно малые размеры и изготовлены с помощью соответствующих технологий.
- Размеры схем с сосредоточенными элементами, как правило, становятся меньше.
- Модель линии передачи с распределенными элементами начинает отличаться от упрощенной модели сосредоточенных элементов при длине проводников в диапазоне 0,01–0,1 длины волны сигнала.

ла. В рассматриваемой симуляции импеданс нагрузки согласован с импедансом линии передачи, и потому отражениями можно пренебречь.

Хотя модель с распределенными параметрами дает хорошее представление о характеристиках типовой НЧ линии передачи, на высоких частотах необходимо также учитывать потери в проводниках и диэлектриках. ◻

ЛИТЕРАТУРА

1. Сергей Краснов. Преимущества анализа в частотной области. Электронные компоненты. № 12. 2019.