

К. т. н. В. К. СИРОТКО

Россия, г. С.-Петербург, «Прософт–Технолоджи»
E-mail: sirotko.vk@mail.ru

Дата поступления в редакцию
11.03 2008 г.

Оппонент д. т. н. Л. Н. КЕЧИЕВ
(МИЭМ, г. Москва)

ПРОГРАММА АНАЛИЗА ПЕРЕКРЕСТНЫХ ПОМЕХ В ЦЕПЯХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Дан обзор существующих программ анализа перекрестных помех в цепях печатных плат, в том числе плат повышенного быстродействия. Предложена разработанная программа АПП.

Программа предназначена для анализа перекрестных помех в цепях печатных плат (ПП), в том числе и ПП повышенного быстродействия [1].

При анализе перекрестных помех необходимо определить величину помех на входах всех микросхем печатной платы, вызванных влиянием соседних цепей, в которых проходят сигналы. При этом необходимо учитывать, что часто одна микросхема передает импульсы нескольким другим, и проводники, соединяющие их, образуют разветвленную схему, а для ПП повышенного быстродействия необходимо учитывать распределенный характер линий передачи сигналов, состоящих из систем прямых и обратных проводников, соединяющих микросхемы.

В последнее время все большее применение находит разработанный в России топологический трассировщик ПП [2], с помощью которого может быть получена недостижимая в других известных трассировщиках плотность трассировки ПП — за счет размещения проводников по кратчайшим расстояниям под произвольными углами, минимизации количества межслойных переходов и использования дугообразных проводников. Описанная в настоящей статье программа позволяет с достаточной для практики точностью решать задачу анализа перекрестных помех и для таких ПП, превосходя в этом известные программы.

На основе информации о топологии печатной платы, толщине слоев металлизации и изолирующих слоев, об электрических характеристиках материалов слоев, размещении шин и проводников цепей питания и заземления, о частоте следования и длительности импульсов сигналов в программе производится оценка возможной величины перекрестных помех для всех сигнальных цепей для наихудшего случая, когда на входах микросхем, для которых определяются величины помех, отсутствуют сигналы.

Для всех цепей ПП в программе формируются эквивалентные схемы, включающие эквивалентные схемы линий передачи, соединяющих микросхемы, контактных площадок, к которым подключены выводы

микросхем, и переходных отверстий. Эквивалентные схемы линий передачи представляют собой симметричные цепные схемы, такие же, как в [1]. Количество ячеек в этих цепных схемах выбирается таким, что обеспечивает достаточную для практики точность определения перекрестных помех для ПП, спроектированных топологическим трассировщиком [2], и для ПП повышенного быстродействия [1]. Количество узлов в эквивалентной схеме цепи может достигать нескольких тысяч.

Определение напряжений перекрестных помех производится на нескольких частотах с помощью быстродействующего и точного алгоритма редукции схем, разработанного автором.

Обзор существующих программ анализа перекрестных помех в цепях ПП

Во многих системах проектирования ПП имеются программы анализа перекрестных помех в цепях. Можно выделить три типа программ:

1) интегрированные с программами трассировки, в которых определение перекрестных помех производится в процессе трассировки цепей, и каждая трасса корректируется, как только вычисленное значение помехи превосходит некоторую заданную величину; например, следующий отрезок проводника прокладывается с увеличенным зазором по отношению к генерирующей помехи цепи;

2) интегрированные в систему проектирования ПП, в которых определение перекрестных помех производится после окончания трассировки всех цепей ПП; далее определяются цепи, наиболее подверженные помехам, и производится повторная трассировка этих цепей;

3) автономные программы, которые производят анализ перекрестных помех полностью спроектированных ПП.

В широко известной программе трассировки SPECCTRA [3] применяется программа анализа перекрестных помех первого типа. Влияние одного проводника на другой трактуется как шум.

Рассматриваются два случая влияния отрезков проводников друг на друга:

- параллельные отрезки проводников в одном и том же слое;
- параллельные отрезки проводников в смежных слоях.

В правилах проектирования задаются условия, определяющие предельно допустимую длину параллельных участков проводников. Такие условия составляются для каждого возможного зазора между параллельными отрезками проводников на каждом слое и между параллельными участками проводников на смежных слоях. Если в процессе прокладки проводника цепи какое-либо условие нарушается, следующий отрезок проводника прокладывается с увеличенным зазором по отношению к генерирующей помехи цепи. Таким образом автоматически обеспечивается, что помехи на любом отрезке проводника, параллельном отрезку проводника другой цепи, будут меньше некоторой заданной величины. Однако каково соотношение между этой величиной и действительно допустимой величиной помех, неясно.

Кроме того, при анализе перекрестных помех важно напряжение помехи на входе микросхемы, а в цепи может оказаться несколько отрезков проводников, на которых возникают помехи, и тогда напряжение помехи на входе микросхемы может оказаться больше допустимой величины.

Таким образом, анализ перекрестных помех оказывается весьма приблизительным. Однако выбирая допустимую величину помехи достаточно малой, можно получить приемлемые для практики результаты. Важным преимуществом программы является автоматическое обеспечение допустимой величины помех в цепях ПП на этапе трассировки.

В программах анализа перекрестных помех в цепях ПП второго типа, например в программе фирмы Altium [4], необходимо выделять группу цепей, перекрестные помехи которых исследуются, указывать цепи-«агрессоры» и цепь-«жертву», что при большом количестве чувствительных к помехам цепей потребует большого количества манипуляций указателем на экране дисплея и многократных запусков программы.

Кроме того, анализ перекрестных помех проводится во временной области (при реальных импульсных сигналах), и помехи вследствие этого представляют собой смесь высокочастотных колебаний различных частот и амплитуд. Это затрудняет оценку возможности ложного срабатывания микросхемы, на входе которой появляется такая помеха.

В программах этого типа определяются напряжения помех на входах микросхем исследуемой цепи с помощью численного интегрирования уравнений цепи, в которых отрезки проводников, контактные площадки (КП), входы и выходы микросхем, а также взаимное влияние отрезков проводников, представлены их электрическими параметрами (сопротивлениями, емкостями и коэффициентами индукции).

Как показано в [5, с. 326], при численном интегрировании таких уравнений, если решение содержит «очень быструю» и «очень медленную» компоненты (а именно такие решения имеют уравнения даже двух связанных цепей ПП), возможны значительные погрешности, иногда приводящие к неверному результату. Преодолеть эти трудности можно за счет применения специальных методов численного интегриро-

вания, например использовать метод Гира [5, с. 463]. Однако сведений об обеспечении необходимой точности анализа перекрестных помех в цепях ПП в [4] не приводится.

Другим недостатком этих программ является отсутствие возможности анализа перекрестных помех в цепях, имеющих разветвления, т. е. когда к цепи подключены несколько входов микросхем. В результате не будут учтены помехи, генерируемые разветвлениями цепей.

В программах анализа перекрестных помех в цепях ПП третьего типа, например в программе Compliance фирмы Quantic EMC Inc. [6], производится анализ электрических и магнитных полей для плоских геометрических конструкций (отрезки проводников, планарные КП), для изломов и пересечений проводников, Т-образных соединений, печатных разъемов, переходных отверстий. На основе этого анализа полей составляются эквивалентные электрические схемы указанных элементов печатного монтажа в формате SPICE.

Далее составляются (с использованием этих эквивалентных схем) описания цепей ПП в формате SPICE и производится анализ во временной области электромагнитной совместимости цепей ПП и анализ искажений сигналов. Определяется также электромагнитное излучение ПП. При превышении допустимого уровня излучения диагностируется цепь или область ПП, вносящая наибольший вклад в уровень излучения. (Следует отметить высокую точность моделирования элементов печатного монтажа. Сообщается, что результаты моделирования совпадают с экспериментальными данными с точностью в несколько процентов.)

Так как программа является автономной, предусмотрен импорт описаний ПП из разных САПР (P-CAD, SPECCTRA, Mentor Board Station, OrCAD, Protel, PADS Power PCB и др.) и просмотр их.

Все рассмотренные программы анализа перекрестных помех в цепях ПП определяют перекрестные помехи только в тех цепях, отрезки проводников в которых размещаются под углами, кратными 45 градусам.

О цели создания и преимуществах программы АПП

Разработка программы анализа перекрестных помех в цепях ПП (АПП) была заказана С. Ю. Лузиным, под руководством которого был создан первый вариант программы трассировки ПП FreeStyle [2], основной особенностью которой была весьма плотная трассировка, обеспечиваемая за счет размещения отрезков проводников по кратчайшим путям в произвольных направлениях, минимизации количества переходных отверстий, использования дугообразных проводников.

У пользователей программы FreeStyle возникало опасение, что при такой плотной трассировке возможно значительное возрастание перекрестных помех, которое может привести к сбоям в работе цифровых узлов. Ни одна из существовавших тогда программ не обеспечивала анализ перекрестных помех для та-

ких ПП, да и в настоящее время, как видно из представленного обзора, не обеспечивает.

Однако автор имел опыт успешной разработки программ анализа характеристик многосвязных линейных схем [7] и функциональных устройств на поверхностных акустических волнах [8], в которых использовались эквивалентные схемы замещения элементов в виде симметричных цепных схем. Программы успешно применялись при проектировании радиоэлектронной аппаратуры на предприятии, где работал автор. Экспериментальная проверка рассчитанных по программам характеристик показала хорошие результаты.

Используя этот же подход (применение эквивалентных схем замещения элементов, в данном случае отрезков проводников, в виде симметричных цепных схем) автору удалось разработать описанную в статье программу.

Перекрестные помехи в цепях ПП представляют собой смесь синусоидальных сигналов различных амплитуд и частот, и сравнивать между собой такие помехи довольно сложно. Поэтому было решено использовать для оценки влияния одной цепи на другую синусоидальный сигнал частоты следования импульсов, а также синусоидальные сигналы, соответствующие нескольким гармоникам. Для каждой частоты проводился отдельный расчет. Это упрощает оценку возможной величины перекрестных помех в цепях ПП. Появляется возможность автоматической сортировки цепей по их чувствительности к помехам.

В программе определение перекрестных помех производится при условии, что все электрически длинные линии передачи согласованы. Для этого в программе предусмотрен расчет волновых сопротивлений для всех слоев анализируемой ПП с учетом ширины всех используемых в ПП проводников, что позволяет выбрать необходимые согласующие сопротивления.

Программа полностью автоматизирована и исключает необходимость ручных манипуляций пользователя с помощью указателя на экране по выбору анализируемых цепей, заданию видов и режимов анализа, форме и содержанию выводимой информации. Все это задается в файле формализованного технического задания (ФТЗ).

Типовое ФТЗ генерируется программой автоматически, и пользователь может перед началом анализа откорректировать его, изменяя нужным образом данные. Все данные ФТЗ снабжены подробными комментариями с указанием пределов их возможного изменения. Это значительно упрощает работу пользователя и не отвлекает его от осмысления результатов анализа. В начале работы программы или по ее окончании ФТЗ может быть выведено на печать.

В программе предусмотрена возможность выделения группы цепей, у которых помехи на входах микросхем превосходят заданную величину. Для этого в ФТЗ необходимо установить значение максимально допустимого напряжения помехи на входах микросхем. Имена этих цепей выводятся в файл РАП (результат анализа помех).

В этот же файл выводятся полные результаты анализа помех (количество цепей, количество отрезков проводников и КП, коэффициенты связей отрезков проводников, минимальное, среднее и максимальное значения напряжения помех на входах микросхем и др.).

Важным преимуществом программы является высокая скорость проведения анализа и достаточно высокая точность. Так, реализованная в настоящее время версия программы проводит полный анализ в частотной области взаимного влияния цепей двухсторонней ПП, содержащей 200 цепей, за 10 с.

Такие результаты получены за счет использования разработанного формата описания сигнальных цепей, в котором проводники соответствуют линиям с распределенными параметрами, КП соответствуют источнику, приемнику сигнала или промежуточному узлу цепи, переходные отверстия и соединения нескольких проводников в одной точке соответствуют узлам разветвления цепи, а также за счет использования точечного изображения ПП, представляющего собой символьный массив, в котором каждой точке изображения соответствует определенный символ. Так, цепочка символов «с» изображает отрезок проводника, группа символов «#» — КП и т. д.

Каждому символу «с» отрезка проводника соответствует Т-образная эквивалентная схема, состоящая из комплексов полных сопротивлений, определяемых на основе коэффициента самоиндукции этого отрезка проводника и его сопротивления, а также емкости и проводимости между прямым и обратным отрезками проводников линии передачи.

Аналогичным образом вводятся символы, имитирующие комплексы взаимных полных сопротивлений отрезков проводников. Таким образом рисунок печатной платы становится рисунком эквивалентной схемы, и оказываются возможными эквивалентные преобразования этой схемы, необходимые для определения напряжений сигналов и помех на входах элементов.

Эквивалентная схема проводника является неоднородной симметричной цепной схемой и при достаточно большом числе звеньев хорошо имитирует передачу сигналов и помех в линиях с распределенными параметрами. Расчеты помех по разработанной программе показали, что удовлетворительные результаты получаются при шаге сетки точечного изображения, равном половине ширины самого тонкого проводника. При этом количество звеньев эквивалентной неоднородной симметричной цепной схемы одной цепи для современных ПП может достигать нескольких тысяч. Все отрезки проводников цепей ПП представлены эквивалентными неоднородными симметричными цепными схемами, имеющими более 10 ячеек. Это гарантирует корректность моделей линий передач практически для всех ПП современных высокоскоростных цифровых систем. Быстрое и точное определение напряжений в узлах таких эквивалентных схем обеспечивается за счет применения метода редукции схем, рассматриваемого ниже.

Разработанная в настоящее время версия 8 программы АПП относится к третьей группе по рассмот-

ренной выше классификации, т. к. в ней предусмотрен импорт описаний ПП из САПР PCAD4.5. В то же время в ней предусмотрена возможность интеграции в САПР TороR [2]: имеется вход в программу АПП, при запуске с которого вместо полного описания ПП используется файл описаний цепей, сформированный в САПР TороR, а выходной файл программы АПП, содержащий полное описание результатов анализа перекрестных помех в цепях ПП, может быть передан в САПР TороR для корректировки цепей, помехи в которых превосходят допустимые значения. То есть, программа АПП имеет признаки, по которым она может быть отнесена ко второй группе по рассмотренной выше классификации.

После некоторой доработки возможно интегрирование программы АПП с программой трассировки САПР TороR. В этом случае программа АПП приобретает признаки программы первой группы по рассмотренной выше классификации, и программа трассировки САПР TороR будет работать аналогично программе SPECCTRA, но с более точным учетом величины перекрестных помех в цепях ПП.

Точечные изображения рисунков топологии ПП

Как указывалось выше, рисунок топологии цепи ПП соответствует рисунку эквивалентной электрической схемы этой цепи. Однако для обеспечения обработки этого рисунка в программе, а также с целью учета распределенного характера параметров проводников, необходимо разбить этот рисунок на достаточно мелкие элементы, для каждого из которых параметры можно считать сосредоточенными.

Наиболее простым способом решения этой задачи является преобразование рисунка топологии слоя ПП в точечное изображение (ТИ), напоминающее изображение на экране телевизора. Группы точек, находящиеся внутри круга, прямоугольника и других фигур, соответствующих КП, являются точечными изображениями КП, а цепочки точек являются точечными изображениями осевых линий отрезков проводников.

Каждая точка на изображении осевой линии отрезка проводника представляет отрезок проводника минимальной длины, который в дальнейшем будет называться элементарным отрезком проводника. Для элементарного отрезка проводника определяются, как будет показано ниже, параметры его эквивалентной электрической схемы.

Для обеспечения необходимой разрешающей способности ТИ необходимо выполнить условие

$$s \leq z/2, \quad (1)$$

где s — расстояние между смежными точками (s кратно $z/2$);

z — минимальный зазор между смежными отрезками проводников.

В программе создается символьный массив, каждый символ которого соответствует одной точке ТИ. В этом массиве размещаются ТИ всех слоев ПП. Для обеспечения высокого быстродействия программы АПП необходимо размещение этого массива в оперативной памяти.

В этом же массиве размещаются ТИ связей между смежными элементарными отрезками проводников, которые так же, как и отрезки проводников, представляют собой цепочки символов. Эти ТИ необходимы для ускорения расчетов комплексов взаимных полных сопротивлений.

Величина комплекса взаимного полного сопротивления между двумя элементарными отрезками проводников, при равной ширине проводников и одинаковых характеристиках диэлектрика и покрытия слоев, зависит от расстояния между ними и расстояния до обратного проводника. Расстояние до обратного проводника одинаково для всех проводников, размещенных на одном и том же слое. Поэтому комплекс взаимного полного сопротивления между двумя элементарными отрезками проводников одинаковой ширины, размещенными на одном и том же слое, зависит только от расстояния между ними.

Единицей измерения расстояний в ТИ ПП является величина s в условии (1), и поэтому расстояние между двумя элементарными отрезками проводников, измеренное этой единицей, будет целым числом. Так как имеет смысл рассматривать взаимные связи только между смежными близко расположенными отрезками проводников, это число лежит в диапазоне 4—60.

Поэтому для ускорения расчетов комплексов взаимных полных сопротивлений можно предварительно рассчитать их для всех возможных расстояний и всех слоев ПП, чтобы затем использовать при проведении эквивалентных преобразований цепей. Это и сделано в программе АПП.

В САПР TороR проводники при проведении трассировки размещаются не только под углами к горизонтальной оси ПП, кратными 45° , как в других САПР, но и, главным образом, под любыми другими, что обеспечивает недостижимую ранее плотность трассировки, уменьшение длины проводников и их взаимного влияния [2]. Кроме того, для сглаживания углов поворота трасс проводников в САПР TороR, наряду с прямолинейными отрезками проводников, широко используются дугообразные отрезки проводников.

Как уже говорилось выше, анализ перекрестных помех в цепях ПП при такой трассировке значительно сложнее, чем при обычно используемой трассировке, и может быть проведен лишь приближенно. Ни одна из существующих в настоящее время программ не обеспечивает проведения анализа электромагнитной совместимости цепей ПП, спроектированных в САПР TороR.

Эта задача приближенно решена в программе АПП за счет формирования ТИ отрезков проводников, замены дугообразных проводников последовательностью хорд, классификации направлений отрезков проводников и рационального выбора направлений отрезков линий, имитирующих комплексы взаимных полных сопротивлений между двумя элементарными отрезками проводников.

На рис. 1 показана используемая в программе АПП классификация направлений отрезков проводников. Толстыми линиями показаны обычно используемые

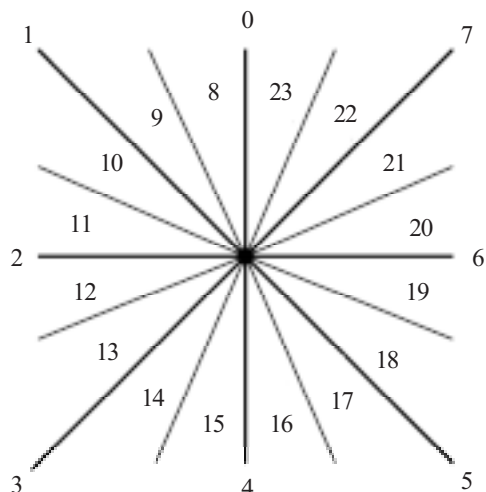


Рис. 1. Классификация направлений отрезков проводников

в САПР ПП направления отрезков проводников. Эти направления обозначаются в программе номерами 0...7. Числа 8...23, показанные на рис. 1 в секторах, разделяемых толстыми и тонкими линиями, обозначают отрезки проводников, имеющие направления лучей в соответствующих секторах. Номера этих направлений 8...23.

Отрезки проводников, имеющие номера направлений 8...23, в ТИ ПП отображаются комбинациями элементарных отрезков проводников, которые имеют номера направлений 0...7. Комбинация элементарных отрезков проводников, обеспечивающая максимально возможное приближение точек, соответствующих элементарным отрезкам проводников, к промежуточным точкам проводников, имеющих номера направлений 8...23, определяется в программе АПП при построении ТИ.

Как указывалось выше, взаимные связи между отрезками проводников в ТИ ПП, так же, как и отрезки проводников, отображаются цепочками символов, которые представляют собой отрезки линий, соответствующие расстоянию между элементарными отрезками проводников соседних цепей. Влияние отрезка проводника цепи на отрезок проводника соседней цепи зависит от расстояния и косинуса угла между ними.

Эквивалентные электрические схемы элементарных отрезков проводников, КП и переходных отверстий

Как указывалось выше, каждому элементарному отрезку проводника соответствует Т-образная эквивалентная электрическая схема, а влияние на каждый элементарный отрезок проводника одного или нескольких других элементарных отрезков проводников определяется объединением их эквивалентных схем, дополненных элементами, учитывающими это влияние.

На рис. 2 показана эквивалентная электрическая схема влияющих друг на друга элементарных отрезков проводников. Последовательные ветви в Т-образных эквивалентных электрических схемах элементарных отрезков представлены сопротивлениями r_l и

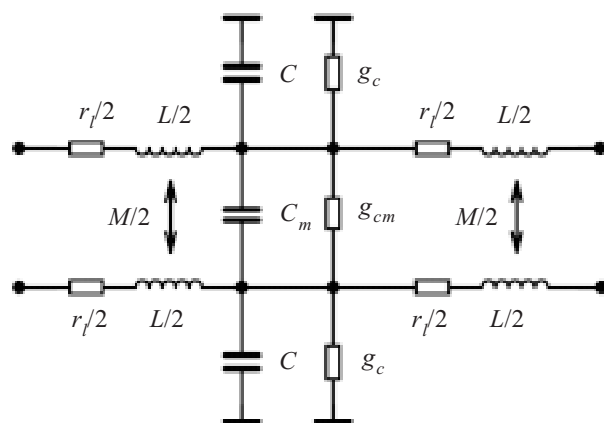


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема влияющих друг на друга элементарных отрезков проводников

коэффициентами самоиндукции L , а параллельные ветви — проводимостями g_c и емкостями C . Индуктивная связь между элементарными отрезками проводников представлена коэффициентом взаимной индукции M , а емкостная связь — ветвью, состоящей из проводимости g_{cm} и емкости C_m .

Параметр r_l рассчитывается в программе АПП с учетом скин-эффекта при высоких частотах по формулам, приведенным в [1, с. 146—149].

С помощью параметров g_c и g_{cm} учитываются потери в диэлектрике вокруг связанных элементарных отрезков проводников. Эти параметры зависят от частоты и определяются как небольшая часть соответствующего комплекса полной проводимости. В программе АПП принято, что величина этих проводимостей равна 2% от соответствующих комплексов полных проводимостей.

Определение параметров L , M , C и C_m должно быть произведено на основе анализа электрических и магнитных полей ПП. Как уже указывалось выше, проводники в программе АПП разбиваются на элементарные отрезки, электрические и магнитные поля которых могут считаться плоскопараллельными. Возникающая при этом погрешность для определения величины помех незначительна, т. к. взаимное влияние определяется только между проводниками, угол между которыми меньше 45° . Помеха же, возникающая в точке перехода от одного отрезка проводника к другому, имеет тот же порядок, что и помеха от одного элементарного отрезка проводника, и не может сколько-нибудь заметно повлиять на результат.

Все отрезки проводников имеют прямоугольные сечения малой высоты, т. е. являются по существу лентами. Чтобы определить плоскопараллельное электрическое поле, создаваемое отрезками проводников связанных цепей, нужно найти уравнения линий равного электрического потенциала и уравнения силовых линий электрического поля, а для определения плоскопараллельного магнитного поля, создаваемого этими же отрезками проводников, необходимо найти уравнения линий равного магнитного потенциала и уравнения силовых линий магнитного поля.

В теории электромагнитного поля [9, с. 53, 181] эти задачи решены точно только для проводников круглого

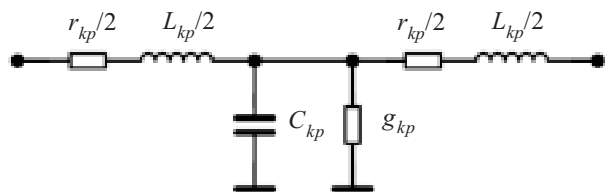


Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема КП

сечения, а для других видов сечения проводников могут быть найдены лишь приближенные решения.

В многослойных ПП всегда имеется по крайней мере один слой заземления, что обеспечивает протекание обратных токов непосредственно под соответствующими сигнальными проводниками. Это позволяет рассматривать все линии передачи сигналов в многослойных ПП как полосковые или микрополосковые линии. Определение параметров эквивалентной схемы рис. 2 в программе АПП для многослойных ПП производится по формулам, приведенным в [9, с. 91, 204] и [1, с. 173].

При определении параметров эквивалентной схемы рис. 2 для двухсторонних ПП следует учитывать, что проводники цепей заземления, по которым протекают обратные токи, почти никогда не располагаются непосредственно под соответствующими сигнальными проводниками, а располагаются на некотором расстоянии, иногда на том же слое, иногда на противоположном. Анализ реальных ПП показал, что для всех сигнальных цепей это расстояние можно принять в среднем равным десятикратному значению толщины ПП. В программе принято, что все сигнальные цепи имеют обратный провод, расположенный параллельно на том же слое на этом расстоянии. Также принято, что сечения прямого и обратного проводников круглые, а диаметр круга равен ширине проводника сигнальной цепи. Это позволяет использовать для определения параметров эквивалентной схемы рис. 2 точные решения, приведенные в [9], что и сделано в программе. Конечно, такие допущения не позволяют достаточно точно определить величину перекрестных помех в ПП, однако результаты расчетов могут быть использованы для сравнительной оценки нескольких вариантов топологии ПП по чувствительности к помехам.

Эквивалентная электрическая схема КП показана на рис. 3. Такая же схема используется для переходного отверстия.

Параметры элементов эквивалентных электрических схем КП и переходных отверстий определяются по формулам, приведенным в [1, с. 173].

Алгоритм анализа перекрестных помех в цепях ПП

На рис. 4 показана эквивалентная электрическая схема двух отрезков проводников цепей ПП, угол между которыми меньше 45° , а расстояние таково, что влияние их друг на друга существенно. Как уже указывалось выше, поиск таких цепей происходит автоматически. Как видно из рис. 4, эквивалентная схема состоит из каскадного соединения эквивалентных схем влияющих друг на друга элементарных отрезков проводников (см. рис. 2). Параметры эквивалентных схем элементарных отрезков проводников могут быть разными (если отрезки проводников цепей имеют разную ширину, не являются параллельными, или расположены на разных слоях), и обозначены одинаковыми символами только для упрощения обозначений.

К началу каждой цепи подключен источник сигнала, имеющий внутреннее сопротивление r_s , а к концу — приемник сигнала, имеющий входное сопротивление R (сопротивление входа микросхемы). Электродвижущая сила источника сигнала нижней цепи на рис. 4 равна E , и эта цепь является «агрессором», а ЭДС источника сигнала верхней цепи равна нулю, и эта цепь является «жертвой».

Показанный на рис. 4 пример является простейшим случаем. В разрабатываемых в настоящее время ПП на цепь-«жертву» могут оказывать влияние до 8 цепей-«агрессоров», в цепи-«жертве» могут быть участки, на которые не оказывает влияние ни одна цепь, дерево цепи-«жертвы» и деревья цепей-«агрессоров» могут содержать до 5 разветвлений. В программе АПП производится анализ перекрестных помех цепей с учетом всех указанных особенностей ПП.

Так как величина сигнала в цифровых цепях на 1—2 порядка превосходит величину возможных помех, то можно пренебречь влиянием электромагнитных полей, создаваемых цепью-«жертвой» на элек-

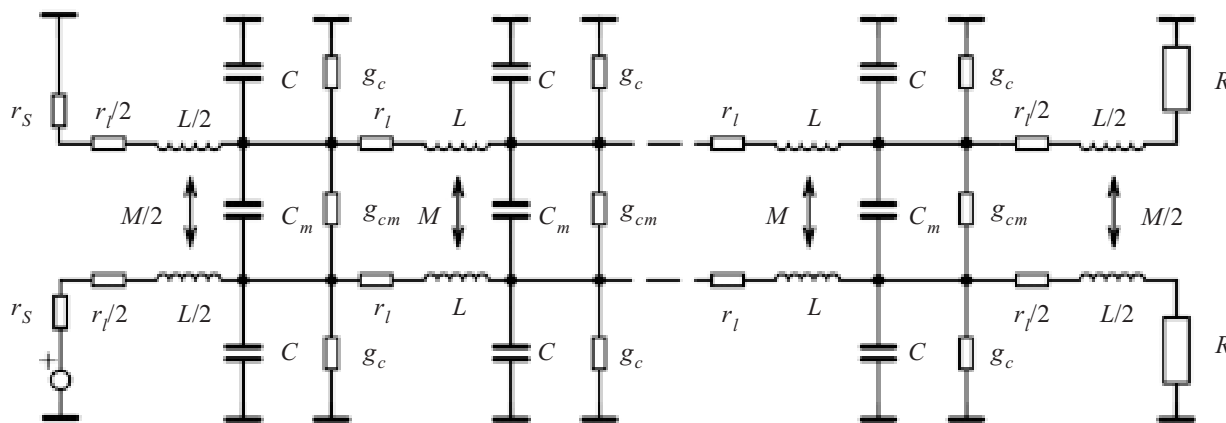


Рис. 4. Эквивалентная электрическая схема двух цепей ПП, используемая при анализе перекрестных помех в этих цепях

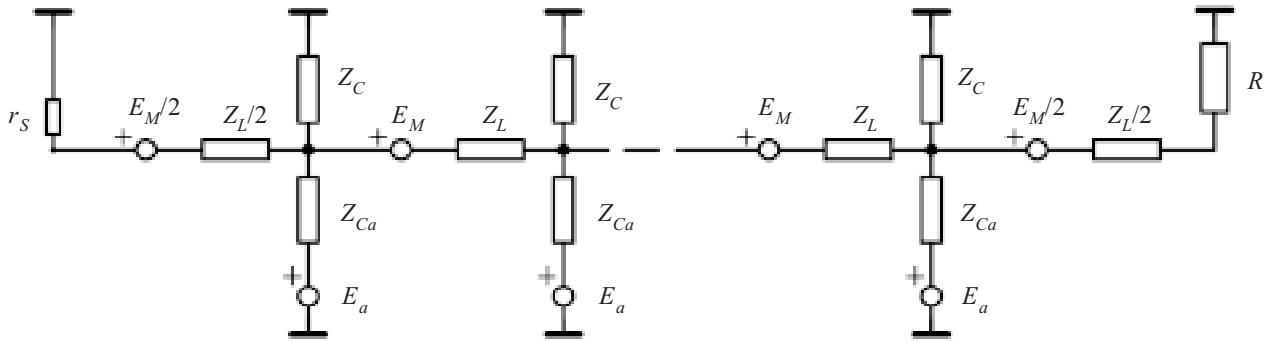


Рис. 5. Электрическая эквивалентная схема цепи с учетом влияния цепей-«агрессоров»

ромагнитные поля, создаваемые цепью-«агрессором», т. е. влияние цепи-«агрессора» на цепь-«жертву» можно считать односторонним. Величина напряжения помехи, определенная при этом предположении, будет больше истинного значения, и, следовательно, помехоустойчивость будет определена с запасом.

С учетом изложенных допущений, а также используя то, что ЭДС и токи в цепи, электрическая эквивалентная схема которой показана на рис. 4, являются синусоидальными функциями времени, а следовательно, возможно использование символического метода [10, с. 85], произведено преобразование этой схемы в электрическую эквивалентную схему, показанную на рис. 5.

Значения комплексов полных сопротивлений Z_L , Z_C , Z_{Cm} и комплексной ЭДС E_M схемы рис. 5 определяются через параметры схемы рис. 4 по известным формулам символического метода [10, с. 92]:

$$Z_L = r_l + j\omega L;$$

$$Z_C = \frac{1}{g_c + j\omega C};$$

$$Z_{Cm} = \frac{1}{g_{cm} + j\omega C_m};$$

$$E_M = I_a(j\omega M), \quad (2)$$

где ω — угловая частота; $j = \sqrt{-1}$.

Напряжения и токи для всех элементарных отрезков проводников в схеме рис. 5 различны по значению, но обозначены здесь одинаковыми символами (E_a и I_a) для упрощения обозначений. Эти значения предварительно рассчитываются для всех элементарных отрезков проводников цепей-«агрессоров» по эквивалентным схемам этих цепей от источников сигналов до приемников сигналов без учета влияния цепи-«жертвы». Как уже указывалось, количество элементарных отрезков проводников (звеньев эквивалентной схемы) для некоторых цепей ПП может быть велико (до нескольких тысяч), поэтому использование матричных методов затруднительно. Эффективное решение этой задачи обеспечивается за счет применения метода редукции эквивалентной схемы, подробно рассмотренного ниже.

Для оценки влияния цепи-«агрессора» на цепь-«жертву» необходимо определить напряжение на сопротивлении R (вход микросхемы) эквивалентной схемы, показанной на рис. 5. Применение символического метода значительно упростило эту задачу, т. к. определение этого напряжения сводится к решению алгебраической системы линейных уравнений, коэффициенты и переменные в которой являются комплексными числами.

Определение этого же напряжения на основе схемы рис. 4 потребовало бы решения системы интегродифференциальных уравнений, что значительно сложнее. В начале статьи уже говорилось о недостатках и сложностях такого анализа.

Другим важным преимуществом представления цепи в виде схемы рис. 5 является возможность редукции схемы путем эквивалентных преобразований ее частей. При этом значительно снижается количество арифметических операций и, что еще важнее, повышается точность вычислений [7, 8, 11, 13].

При нахождении решения алгебраической системы линейных уравнений, соответствующей всей цепи, производятся вычисления определителей этой системы, с помощью которых вычисляются значения всех переменных. При увеличении количества уравнений системы n количество арифметических операций увеличивается пропорционально n^3 , и сильно возрастает количество операций вычитания, у которых разность значительно меньше уменьшаемого и вычитаемого, и, следовательно, погрешность велика [5, с. 332].

При редукции схемы путем эквивалентных преобразований ее частей вычисляются определители этих частей системы линейных уравнений, соответствующей всей цепи, которые могут соответствовать во много раз меньшему количеству уравнений n , чем количество уравнений, соответствующее всей цепи. Вследствие этого количество арифметических операций уменьшится пропорционально n^3 и уменьшится погрешность, вызванная указанными выше операциями вычитания.

Особенно эффективны эквивалентные преобразования, когда схема разделяется на большое количество мелких частей, например эквивалентные преобразования последовательно или параллельно соединенных ветвей, а также преобразования «звезда—треугольник», при выполнении которых отсутствуют операции вычитания [14, с. 107].

В [7, 8, 12] приведены описания и результаты опытной эксплуатации программ, основанных на разделении схемы на большое количество мелких частей и использовании преобразований этих частей, подтвердившие эффективность такого подхода.

Однако не всякая схема может быть разделена на достаточно мелкие части, чтобы можно было использовать эквивалентные преобразования последовательно или параллельно соединенных ветвей, или преобразования «звезда—треугольник». В [12, с. 18, 58, 161] предложены преобразования цепей, называемые преобразованиями переноса I и II рода и преобразованиями обращения ветвей, которые позволяют разделить сложную схему на ряд подсхем, называемых эквивалентными многомерными генераторами. Показаны примеры применения этих преобразований при расчете сложных электрических цепей.

В [13] приведены сведения о программе расчета частотных характеристик линейных цепей методом редукции, в которой реализованы преобразования переноса I рода и преобразования обращения ветвей, правда, называются они просто эквивалентными преобразованиями. Опытная эксплуатация этой программы показала высокую точность расчетов и малые затраты машинного времени, что делает целесообразным использование при разработке программ анализа цепей метода эквивалентных преобразований вместо матричных методов.

Анализ схемы рис. 5 показывает, что для определения величины напряжения помех можно успешно использовать простейший вид эквивалентных преобразований — эквивалентные преобразования последовательно или параллельно соединенных ветвей цепи с учетом возможного наличия в преобразуемых ветвях источников напряжения. В результате этих преобразований схема рис. 5 свертывается до одной ветви (эквивалентного генератора), состоящей из эквивалентного комплекса полного сопротивления и эквивалентного источника напряжения, подключенной параллельно к сопротивлению R (входу микросхемы). Из этой простейшей схемы легко определяется напряжение помехи.

Рассмотрим процесс редукции подробнее. Обозначим в ветви эквивалентного генератора E_g — эквивалентный источник напряжения; Z_g — эквивалентный комплекс полного сопротивления. Преобразования эквивалентной схемы рис. 5 и формулы определения параметров преобразованных ветвей показаны на рис. 6—10.

Как видно из рис. 6—10, при вычислении комплекса полного сопротивления эквивалентного генератора отсутствуют операции вычитания, что гарантирует высокую точность вычислений. Операция вычитания при определении ЭДС эквивалентного генератора (при преобразовании последовательно соединенных ветвей) не приводит к увеличению погрешности вычислений, т. к. из физических соображений величины E_g и E_M не могут быть так близки по величине, чтобы их разность была соизмерима с погрешностью вычислений компьютера.

Как указывалось выше, схема рис. 5 является простейшим случаем, т. к. позволяет определить напря-

жение помехи на входе микросхемы цепи, обусловленное влиянием только одной цепи. Кроме того, в цепи-«жертве» отсутствуют элементарные проводники, на которые цепь-«агрессор» не оказывает влияния. Такая упрощенная схема выбрана для того, чтобы наглядно описать процесс эквивалентных преобразований при определении напряжения помех.

В то же время, схема рис. 5 может быть модифицирована таким образом, что будут учтены все случаи взаимного влияния цепей ПП при анализе перекрестных помех. Такая модифицированная схема и используется в программе АПП.

Рассмотрим кратко эти модификации. Если в цепи-«жертве» присутствуют элементарные проводники, на которые цепь-«агрессор» не оказывает влияния, то в структуру схемы цепи-«жертвы» вводятся эквивалентные схемы таких отрезков проводников, которые аналогичны эквивалентным схемам, показанным на рис. 5, но не содержат ветвей (E_M) и (E_a , Z_{Cm}).

Если на цепь-«жертву» оказывают влияние несколько цепей-«агрессоров», то в соответствующую ветвь схемы рис. 5 вводятся значения взаимных комплексов полных сопротивлений и комплексных ЭДС, учитывающих суммарное влияние цепей-«агрессоров», которые определяются по следующим формулам:

$$E_{Mn} = \sum_{k=1}^{k=n} E_{Mk}; \quad (3)$$

$$Z_{Cmn} = \left[\sum_{k=1}^{k=n} \frac{1}{Z_{Cmk}} \right]^{-1}; \quad (4)$$

$$E_{an} = \left[\sum_{k=1}^{k=n} \frac{E_{ak}}{Z_{Cmk}} \right] Z_{Cmn}, \quad (5)$$

где n — количество цепей-«агрессоров», влияющих на цепь-«жертву»;

E_{Mn} — комплексная ЭДС, соответствующая индуктивному влиянию n цепей-«агрессоров» на цепь-«жертву»;

E_{Mk} — комплексная ЭДС, соответствующая индуктивному влиянию k -й цепи-«агрессора» на цепь-«жертву»;

Z_{Cmn} — комплекс полного сопротивления, соответствующий емкостному влиянию n цепей-«агрессоров» на цепь-«жертву»;

Z_{Cmk} — комплекс полного сопротивления, соответствующий емкостному влиянию k -й цепи-«агрессора» на цепь-«жертву»;

E_{an} — комплексная ЭДС, соответствующая емкостному влиянию n цепей-«агрессоров» на цепь-«жертву»;

E_{ak} — комплексная ЭДС, соответствующая емкостному влиянию k -й цепи-«агрессора» на цепь-«жертву».

Цепь, показанная на рис. 5, имеет всего один приемник сигнала (вход микросхемы), и редукция схемы осуществляется самым простым способом — эквивалентные преобразования производятся в направлении от начала цепи к ее концу, в результате чего определяется напряжение на входе микросхемы.

Однако если в цепи имеется несколько приемников сигналов и цепь содержит разветвления, редук-

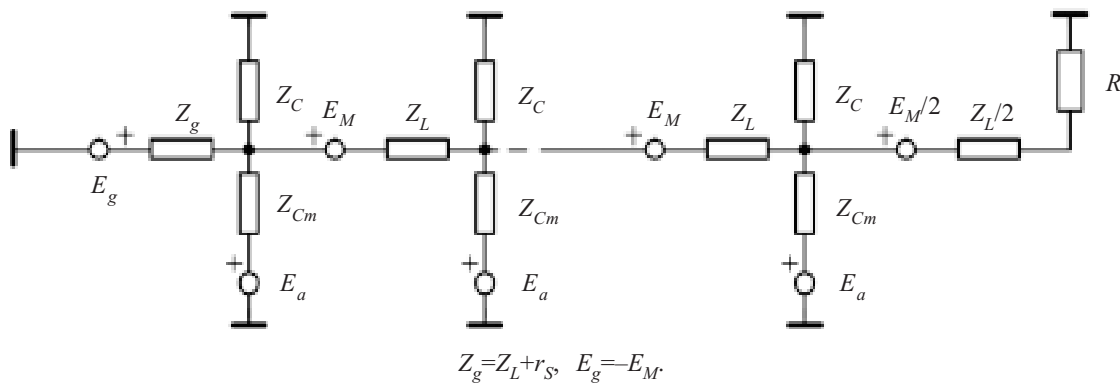


Рис. 6. Преобразование последовательно соединенных ветвей (r_s) и (E_M, Z_L)

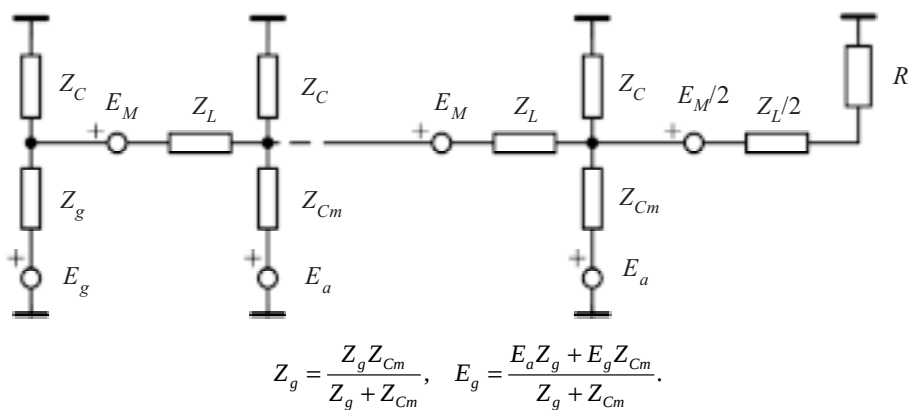


Рис. 7. Преобразование параллельно соединенных ветвей (E_g, Z_g) и (E_a, Z_{Cm})

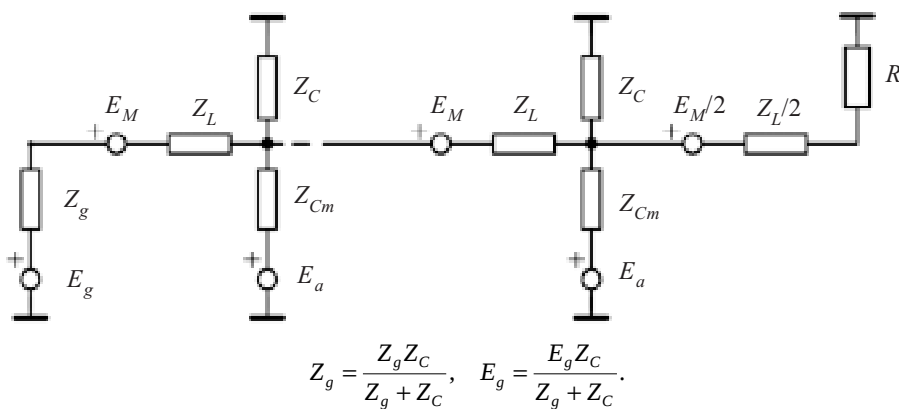


Рис. 8. Преобразование параллельно соединенных ветвей (E_g, Z_g) и (Z_C)

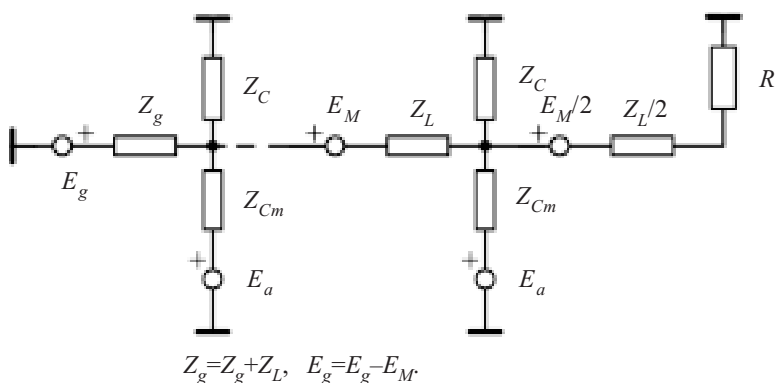


Рис. 9. Преобразование последовательно соединенных ветвей (E_g, Z_g) и (E_M, Z_L).

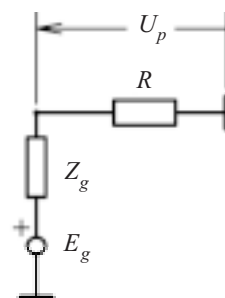


Рис. 10. Вид схемы рис. 5 после окончания редукции и формула определения напряжения помех U_p

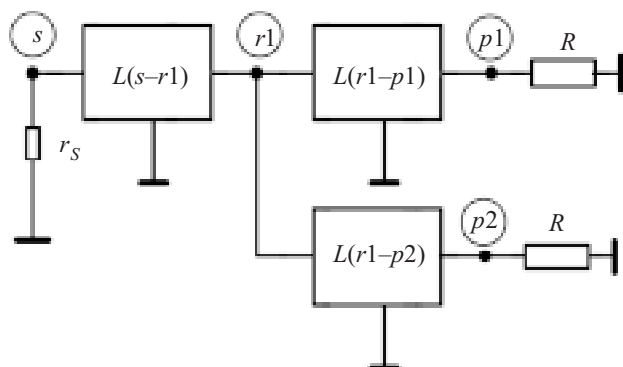


Рис. 11. Схема разветвленной цепи

ция схемы усложняется. На **рис. 11** показана схема цепи такого типа, которая имеет два приемника сигналов и содержит одно разветвление.

Символы $s, r1, p1, p2$ обозначают соответственно узел подключения источника сигналов, узел разветвления и узлы подключения приемников сигналов. Сигнал в цепи отсутствует, поэтому ветвь источника сигналов содержит только внутреннее сопротивление источника r_s . Сопротивления R соответствуют входным сопротивлениям приемников сигналов.

Подсхемы $L(s-r1), L(r1-p1), L(r1-p2)$ содержат эквивалентные схемы одного или нескольких последовательно включенных отрезков проводников, аналогичных показанным на рис. 5. Редукция этих подсхем производится в соответствии с рис. 6–10.

Редукция схемы рис. 11 при определении напряжения узла $p1$ показана на **рис. 12–15**.

Определение напряжения на сопротивлении R производится так же, как на рис. 10. Редукция схемы

рис. 11 при определении напряжения узла $p2$ производится аналогично, но после того как схема примет вид рис. 12, вместо редукции подсхемы $L(r1-p2)$ выполняется редукция подсхемы $L(r1-p1)$.

Так как программа АПП предназначена для анализа перекрестных помех цифровых электронных цепей, количество разветвлений в цепях, анализируемых с помощью этой программы, ограничено пятью. Этого вполне достаточно для разрабатываемых в настоящее время ПП, в которых до 80% цепей не имеют разветвлений, а остальные имеют не более двух-трех разветвлений.

Представление промежуточных данных и результатов анализа перекрестных помех в программе

На основе файла символьного описания топологии ПП (pdf-файла) САПР PCAD-4.5 или на основе формируемого САПР TороR файла символьного описания топологии цепей ПП (осс-файла) в программе АПП создается главный рабочий массив Ogc , содержащий описание геометрических характеристик сигнальных цепей ПП и другие рабочие массивы.

В процессе работы программы АПП массив Ogc дополняется описаниями ТИ, необходимых для формирования моделей элементарных отрезков проводников и вычисления значений помех на входах микросхем.

В процессе проведения анализа перекрестных помех описание каждого отрезка проводника цепи, на который оказывают влияние соседние цепи, дополняется значениями коэффициентов, характеризующих это влияние, а описание каждой КП, соответствующей входу микросхемы, в цепи, на которую оказы-

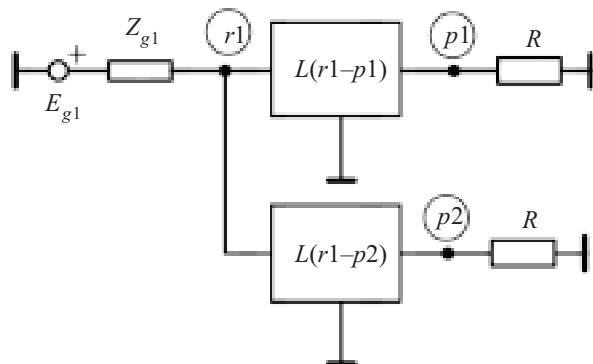


Рис. 12. Редукция подсхемы $L(s-r1)$

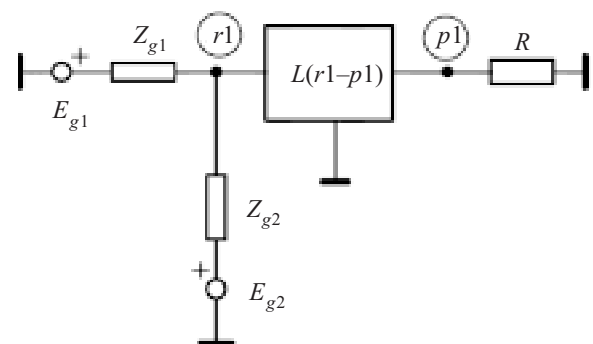


Рис. 13. Редукция подсхемы $L(r1-p2)$

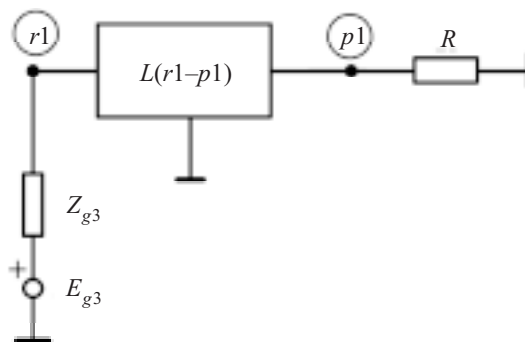


Рис. 14. Эквивалентное преобразование ветвей (E_{g1}, Z_{g1}) и (E_{g2}, Z_{g2})

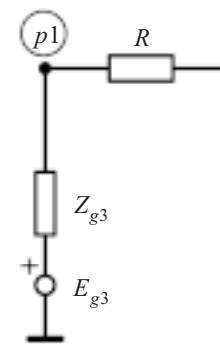


Рис. 15. Редукция подсхемы $L(r1-p1)$

вают влияние соседние цепи, дополняется вычисленными значениями помех. Таким образом, в этом рабочем массиве находятся полные результаты анализа перекрестных помех в формате, удобном для машинной обработки с помощью, например, САПР ТороR.

Для упрощения обработки этого массива предусмотрена выдача файла Oscrд, в который записываются из него описания только тех цепей, напряжения помех на входах микросхем которых больше величины, заданной в ФТЗ.

Для общей визуальной оценки уровня помех по команде «Показать/ТИ слоев ПП» на дисплей выводятся ТИ слоев ПП, на которых помечаются все элементарные отрезки проводников, влияющие друг на друга.

По команде «Показать/ Результаты анализа» пользователь может просмотреть файл РАП (результаты анализа помех), в который выводятся полные результаты анализа помех (количество цепей, количество отрезков проводников и КП, коэффициенты связей отрезков проводников, минимальное, среднее и максимальное значения напряжения помех на входах микросхем и др.).

Предусмотрено также динамическое отображение на дисплее этапов работы программы АПП, выполняемое модулем огр. Модуль представляет собой развитие широко используемого в Windows элемента управления индикатором выполнения [15], но в отличие от него, кроме индикации процента и времени выполнения этапа, обеспечивает также отображение названия выполняемого этапа, основные результаты работы этапа и объем используемой программой АПП оперативной памяти в «куче» на каждом этапе.

Это позволяет пользователю быстро оценить результаты работы программы анализа на каждом этапе, установить, на каком этапе происходит сбой в случае неправильной работы программы, и определить время проведения анализа.

Модуль огр представляет собой простейший встроенный отладчик и очень полезен при развитии и доработке программы и устранении ошибок в программе. Объем программного кода модуля огр и вызываемое его работой замедление работы программы АПП незначительны.

Сравнение результатов расчетов перекрестных помех в программах АПП и HyperLynx

Для оценки корректности моделей, используемых в программе АПП, определения точности расчетов перекрестных помех и частотного диапазона, в котором эта программа может быть использована, было проведено сравнение результатов расчетов перекрестных помех на одной и той же ПП по программе АПП и в программе HyperLynx [1].

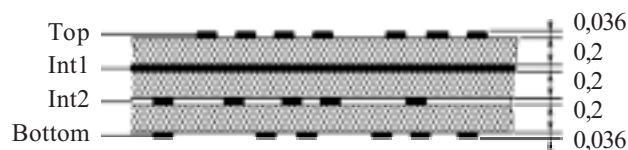


Рис. 16. Поперечный разрез фрагмента ПП, используемой для сравнительных расчетов перекрестных помех по программам АПП и HyperLynx

На рис. 16 показан в поперечном разрезе фрагмент ПП, для которой проводились сравнительные расчеты. Трассировка на этой ПП выполнена в двух направлениях (вертикальном и горизонтальном), что обеспечивает корректное сравнение программ АПП и HyperLynx.

Расчет волновых сопротивлений показал:

- по программе HyperLynx: на слое Top $Z_0=55,0$ Ом, на слое Bottom $Z_0=80,7$ Ом;
- по программе АПП: на слое Top $Z_0=55,620$ Ом, на слое Bottom $Z_0=80,713$ Ом.

Этот результат говорит о достаточно высокой точности определения емкости и коэффициентов самоиндукции элементарных отрезков проводников, на основе которых в программе АПП вычисляются волновые сопротивления.

К сожалению, в сравниваемых программах используются разные режимы работы линий передачи при определении величины перекрестных помех:

— в программе HyperLynx цепь-«агрессор» и цепь-«жертва» не имеют терминаторов, т. е. на приемных концах линий включена только входная емкость вывода микросхемы. Это обеспечивает максимально возможную величину помех. «Наводка» на линии-«жертвы» рассчитывается во временной области по длительности фронтов трапецидального импульса в линии-«агрессоре». Величины «наводок» от двух самых сильных «агрессоров» складываются. Этот расчет является предварительным. По результатам расчетов находятся наиболее чувствительные к помехам цепи, для которых проводится детальное моделирование. В процессе этого моделирования подбираются необходимые терминаторы, уменьшающие величину помех и отражения сигналов, или производятся изменения топологии этих цепей;

— в программе АПП принято, что все цепи имеют нагрузки, определенные на основе известных волновых сопротивлений, и напряжения помех на входах микросхем в цепи-«жертвы» вычисляются с помощью эквивалентной цепной схемы, в каждую ячейку которой введены источники напряжения, имитирующие индуктивное и емкостное влияние цепи «агрессора» на цепь-«жертву». Этот расчет, как и расчет по HyperLynx, является предварительным. По результатам вычислений находятся наиболее чувствительные к помехам цепи и производятся изменения топологии этих цепей.

Естественно, что ожидать полного совпадения результатов не приходится. Для определения до некоторой степени сопоставимых результатов синусоидальный сигнал в программе АПП выбирался таким, чтобы угол наклона восходящего участка синусоиды максимально приближался к переднему фронту трапецидального импульса. Расчеты показали, что длительности переднего фронта трапецидального импульса в программе HyperLynx в 1 нс соответствует частота синусоидального сигнала в программе АПП 200 МГц, 2 нс — 100 МГц, 4 нс — 50 МГц.

Результаты расчетов величины перекрестных помех U_p по сравниваемым программам для всех цепей ПП:

Цепь	КП	U_p , мВ					
		АПП	HyperLynx	АПП	HyperLynx	АПП	HyperLynx
		50 МГц	4 нс	100 МГц	2 нс	200 МГц	1 нс
DCLO	D14:2	25	—	50	—	23	—
	D13:2	28	—	57	—	34	—
	D6:14	26	100	128	189	228	298
RPLY	D14:3	35	—	69	—	19	—
	D13:3	38	—	79	—	33	—
	D6:11	48	156	215	295	374	472
IOW	D1:3	56	130	176	255	281	496
ADR20	D1:48	53	98	182	193	306	364
IAKO	D1:80	52	44	124	86	178	159
RES	D1:46	23	54	98	106	142	172
SIA	D1:79	58	104	139	206	316	387
REST	D1:54	32	85	126	168	261	323
ADR18	D1:57	24	52	100	103	218	193
IRQ7	D1:17	28	104	128	109	300	216

— по программе АПП —
200 МГц $U_p=1,21...66...374$ мВ,
100 МГц $U_p=0,46...27...215$ мВ,
50 МГц $U_p=0,09...9...58$ мВ;

— по программе HyperLynx —
1 нс $U_p=10...496$ мВ,
2 нс $U_p=10...295$ мВ,
4 нс $U_p=10...156$ мВ.

В таблице приведены подробные результаты расчетов перекрестных помех для 10 цепей ПП, имеющих наибольшую чувствительность к помехам.

Как видно из таблицы, перекрестные помехи, рассчитанные по программе АПП на частотах 100 и 200 МГц, достаточно близки к перекрестным помехам, рассчитанным по программе HyperLynx при соответствующих значениях длительности фронта трапецеидального импульса 2 и 1 нс. Однако при расчетах на частоте 50 МГц (соответствующая длительность фронта трапецеидального импульса 4 нс) величины помех, рассчитанные по программе АПП, в ряде случаев в несколько раз меньше, чем величины помех, рассчитанные по программе HyperLynx. Эти различия в результатах расчетов могут быть объяснены, как указывалось выше, разными режимами работы линий передачи при определении величины перекрестных помех.

Обе сравниваемые программы не могут быть использованы для достаточно точного определения величины перекрестных помех, но позволяют определить цепи, наиболее чувствительные к перекрестным помехам. Приведенные результаты сравнительных расчетов позволяют сделать вывод, что программа АПП может быть использована для оценки чувствительности цепей ПП к перекрестным помехам в тех же частотных диапазонах, что и программа HyperLynx.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Кечиев Л. Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры.— М.: ООО «Группа ИДТ», 2007.
2. Лузин С., Полубасов О. Топологическая трассировка: реальность или миф?— EDA EXPERT.— 2002.— № 5.— С. 42—46.
3. Елшин Ю. М. Справочное руководство по работе с подсистемой SPECSTRA в PCAD 2000.— М.: СОЛОН-Р, 2002.
4. Altium. Putting Signal Integrity in its Place. Article: ARO127 (v.1.0). December 22, 2003.
5. Чуа Л. О., Лин Пен-Мин. Машинный анализ электронных схем: Алгоритмы и вычислительные методы.— М.: Энергия, 1980.
6. http://www.quantec-emc.com/compliance_new.asp.
7. Виноградова В. А., Сиротко В. К. Анализ на ЭВМ многозвенных линейных цепных схем в частотной и временной областях // Обмен опытом в радиопромышленности.— 1975.— Вып. 6.— С. 148—150.
8. Виноградова В. А., Сиротко В. К. Автоматизация проектирования функциональных устройств на поверхностных акустических волнах.— Л.: ЛДНТП, 1988.
9. Нейман Л. Р., Калантаров П. Л. Теоретические основы электротехники. Ч. I. Физические основы электротехники.— Л., М.: Госэнергоиздат, 1948.
10. Нейман Л. Р., Калантаров П. Л. Теоретические основы электротехники. Часть III. Теория электромагнитного поля.— Л., М.: Госэнергоиздат, 1948.
11. Калантаров П. Л., Нейман Л. Р. Теоретические основы электротехники. Часть II. Теория переменных токов.— Л., М.: Госэнергоиздат, 1948.
12. Калахан Д. Методы машинного расчета электронных схем.— М.: Мир, 1970.
13. Шакиров М. А. Преобразования и диакоптика электрических цепей.— Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980.
14. Рубинова А. Я., Сиротко В. К. Расчет частотных характеристик линейных схем методом редукции цепей // Обмен опытом в радиопромышленности.— 1973.— Вып. 10.— С. 128—130.
15. Саймон Р. Windows 2000 API. Энциклопедия программиста.— К., СПб.: ООО «ДиаСофтЮП», 2002.