

М.М. Суханов

Системы автоматизированного проектирования для ЭМС

Because of increasing speed of digital systems, problems of electromagnetic compatibility (EMC) came to the first place in the design of printed circuit boards. One of the main directions in design of electromagnetic compatible digital systems is the using of CADs.

Весьма важной стадией в проектировании аппаратуры должны быть средства САПР для прогнозирования эмиссии радиочастотных помех и восприимчивости с достаточной для поставленных целей точностью, опираясь на проектные параметры изделия. Это позволит применить соответствующие технологии обеспечения ЭМС и избежать дорогостоящих последующих доработок.

Проектируемое оборудование требует наличия минимального числа ошибок или полного их отсутствия. Решение проблемы заключается в правильной организации разработки и решении этих вопросов на ранних этапах проектирования. При проектировании высокоскоростного электронного оборудования стало фактически обязательным обеспечение неискажённой передачи сигналов, а значит, ни одна печатная плата не может быть изготовлена без использования специализированного программного обеспечения, облегчающего анализ целостности сигналов и ЭМС.

Если такой анализ откладывается до завершающих этапов проектирования, а основные надежды возлагаются на последующую доработку конструкции, то рентабельность производства резко снижается и увеличивается длительность цикла изготовления. С повышением качества предтопологического и посттопологического анализа растёт вероятность создания корректной разработки за более короткий период времени [1, 2].

Моделирующие программные пакеты

Любая задача ЭМС может быть представлена в терминах источника помех, пути прохождения и рецептора помех. Структура пути связи может включать как механизм излучения, так и кондуктивный, и это часто подлежит анализу, например, напряжение и ток на интерфейсе аппаратуры является результатом связи аппаратуры с внешним полем.

Другой задачей является определение модели передачи радиочастотной энергии, проходящей через экран, как линии передачи. Методы, которые описывают электромагнитные модели в данном случае, построены на одном или нескольких методах: конечные разности, метод моментов, модель линии передачи или метод конечных элементов для непосредственного решения уравнения Максвелла. Каждый из подходов имеет свои преимущества в особых ситуациях. Например, метод моментов результативен при анализе проводов, что подобно проектированию антенн, метод конечных элементов или использование модели линии связи (TLM) более применим для задач с неоднородными средами и сложной геометрией, таких как поверхностные токи на корпусе.

Для того чтобы проблема могла быть успешно решена с возможным учетом резонансных явлений, необходимы аппроксимации исходных данных. Для примера, связь в ближней зоне значительно сложнее поддается анализу, чем в дальней, поскольку природа источника существенно влияет на падающую волну. Размер отверстий в экране является критическим фактором, поскольку при относительно больших размерах отверстия (размер по сравнению с длиной волны) внутренние и внешние области могут рассматриваться совместно, тогда как моделирование проникновения поля через малое отверстие может способствовать получению точного результата.

Для моделирования электронной системы на этапе создания виртуального прототипа в основном используются пакеты прикладных программ. В них этапы схемотехнического моделирования и разработки топологии плат или интегральных схем разделены. Сначала проводится моделирование электронных схем без учета паразитных эффектов, присущих реальным топологиям, а затем после конструкции моделирование повторяется с их учетом. Эта процедура охватывает с той или иной полнотой задачи обеспечения целостности сигналов и ЭМС. Ниже приведен краткий обзор наиболее известных программ анализа целостности сигналов с целью иллюстрации возможностей САПР в этой сфере.

Программы предтопологического и посттопологического анализа

Для проведения исследований посттопологического проектирования могут использоваться следующие инструментальные средства анализа ЭМС: Omega Plus, Signal Integrity Analyzer, BoardSim, ХТК и др. Провести более эффективное исследование проблемы электромагнитных помех позволяет использование программных средств предтопологического анализа (LineSim, ePlanner, BLAST, QUIET, QUIET Expert и др.) на ранних стадиях цикла проектирования изделия, когда составляющие недоступны, и анализ ведется по эквивалентным схемам. Такой подход позволяет снизить временные и финансовые затраты в процессе проектирования изделий, отвечающий требованиям целостности сигнала и ЭМС. Для проведения электромагнитного моделирования могут использоваться следующие программные продукты: FLO/EMC, Microwave Office, IE3D, FIDELITY, HFSS, SimLab и др.

HyperLinx – средство анализа целостности сигналов и ЭМС. В настоящее время включает в себя два продукта: LineSim и BoardSim.

LineSim позволяет представить печатный узел в виде эквивалентной схемы, микросхемы и дискретные элементы которой представляются соответствующими IBIS-моделями. А печатные проводники на плате – моделями линии передачи. Библиотеки компонентов содержат около 7000 моделей и легко могут быть пополнены. Пользователь может получить начальную информацию о работоспособности после задания последовательности слоев платы. Результат анализа позволяет конкретизировать требования к топологии, а модуль – передать их в систему проектирования.

BoardSim – работает с реальным чертежом платы. В данный модуль может быть загружен проект плат, разработанный практически в любом современном пакете проектирования. Имеются средства расчета полных сопротивлений проводников с учетом многослойной структуры платы, оценки степени согласования их с нагрузкой и оптимизации топологии для решения проблемы целостности сигналов.

ePlanner – предтопологическое средство анализа. Позволяет провести оценку проекта на этапе разработки базовой концепции. Например можно построить графические модели топологий цепей с помощью разного рода «мастеров». Это позволяет рассмотреть различные подходы к проектированию. Предложенные топологии, ограничения на сигналы и варианты окончных устройств могут моделироваться для оценки их влияния на временные показатели и качество сигналов. Предварительные оценки параметров уточняются и передаются вместе со списком соединений в среду проектирования плат.

Blast – модуль, предназначенный для статистического анализа временных характеристик. Модуль Blast решает задачи построения проектов с использованием элементов, у которых определены минимальные или максимальные временные характеристики. Он моделирует худший случай с точки зрения временных параметров и позволяет сделать вывод о работоспособности проекта. Мощной функциональной возможностью программы является многообразие методов определения значений задержек межплатных соединений, что позволяет плавно увеличивать точность вычислений.

ХТК – специализированный инструмент для анализа целостности сигналов и перекрестных искажений в сложных многослойных платах. Это система посттопологического анализа. После проведения подробного анализа всего проекта, с учетом заранее заданных критериев, генерируется отчет с описанием всех выявленных нарушений. В программе используются собственные оригинальные алгоритмы, позволяющие повысить скорость анализа. Параметрический и статистический анализ проводится методом Монте-Карло. Модуль поддерживает широкий набор моделей устройств.

QUIET – расширенный модуль ХТК, полезен на всех этапах разработки проекта. Позволяет проводить анализ электромагнитных помех на системном уровне, в том числе в цепях питания и заземления; анализ целостности сигналов и перекрестных искажений на уровне отдельных плат. Также есть возможность задать стратегию трассировки для наиболее критических цепей, определить стратегию распределения нагрузки в цепи, разрешить проблемы межслойных связей в платах, установить наборы правил проектирования и т.д. Данная программная среда позволяет решить проблемы ЭМИ с помощью метода подбора, учитывает дифференциальные и синфазные источники помех. Поддерживает широкий набор библиотек элементов и совместимость с IBIS и SPICE моделями.– отдельное средство управления моделированием ЭМС, которое может использоваться как дополнительный компонент к САПР платы (EDA). Быстрые методы моделирования для анализа целостности сигнала объединены с физическими критериями

проверки, что позволяет минимизировать затраты времени на проверку качества платы. Программа имеет специально разработанный быстрый имитатор целостности сигнала, использует метод граничных элементов (МГЭ), внедрены новые методы лучевого анализа, который эффективен при идентификации источника излучения. Позволяет проводить расчеты волновых сопротивлений и временных задержек.

Omega Plus – данный пакет предназначен для высокоскоростного анализа целостности сигнала и моделирования ЭМС, он также использует МГЭ и позволяет решать задачи экранирования платы:

- экранирование одной группы микросхем от другой;
- анализ линии связи с учетом перекрестных помех и потребностей в экранировании.

Также пакет позволяет проводить расчет паразитных эффектов и моделировать электромагнитное излучение на стадии трассировки. Анализ целостности сигнала может быть проведен до и после трассировки платы.

Signal Integrity – модуль анализа целостности сигналов, встроенный в систему Protel 99 SE. Все элементы проводников на плате представляются здесь в виде отрезков линии передачи, после чего проводится расчет переходных процессов при воздействии на них импульсных сигналов. Помимо расчета формы сигнала в каждом узле проводника здесь выполняется анализ перекрестных искажений. Особенностью данного модуля является то, что здесь не учитываются физические эффекты, связанные с распределением токов в проводниках земли и питания. Эти цепи считаются идеальными.

HFSS – мощный пакет программ, вычисляющий электромагнитные поля для пассивной трёхмерной структуры произвольной формы. Пакет использует FEM-метод с тетраэдральным разбиением моделируемой структуры. Каждый отдельный элемент сетки может состоять из определенного материала, что позволяет программе HFSS анализировать очень сложные геометрии с различными диэлектрическими неоднородностями. Автоматизированный механизм адаптации сетки разбиения позволяет правильно воспроизводить форму объектов без вмешательства пользователя.

IE3D – позволяет проводить моделирование и расчет конструкций на электродинамическом уровне – это новая технология для выполнения точного анализа и проектирования сложных печатных схем в диапазоне СВЧ. Пакет способен рассчитывать полностью трехмерные объекты, используя неоднородную сетку, состоящую из треугольников и прямоугольников.

ADS Momentum – программа для электромагнитного моделирования планарных устройств, предназначенная для улучшения точности расчета пассивных ВЧ и СВЧ цепей и моделей схемы. Предоставляет разносторонние настройки по контролю наложения сетки. Сетка может комбинировать не только треугольники и прямоугольники, но и полигоны любой сложности. Это позволяет существенно сократить количество переменных для расчета плоскостойких структур, тем самым ускоряя вычисления. Однако моделированию полностью трехмерных структур препятствует неспособность рассчитывать диэлектрические слои конечных размеров. Это ограничение было снято в последней версии пакета ADS, куда был включен модуль EMDS, базирующийся на методе конечных элементов (FEM).

CST Microwave Studio - представляет собой программу, предназначенную для быстрого и точного численного моделирования высокочастотных устройств (антенн, фильтров, ответвителей мощности, планарных и многослойных структур), а также анализа проблем целостности сигналов и электромагнитной совместимости во временной и частотных областях с использованием прямоугольной или тетраэдральной сеток разбиения.

Главным преимуществом вычислительных технологий компании CST является использование аппроксимации для идеальных граничных условий (Perfect Boundary Approximation, PBA). При моделировании 3D структур, содержащих поверхности сложной кривизны, использование классической прямоугольной сетки разбиения приводит к необходимости использовать слишком мелкую сетку и неоправданно большое число ячеек. Использование тетраэдральной сетки (рис. 1) частично решает проблему и позволяет снизить требования к вычислительным ресурсам. Технология PBA использует преимущества обоих перечисленных подходов, но обеспечивает беспрецедентный прирост производительности без потери точности вычислений.

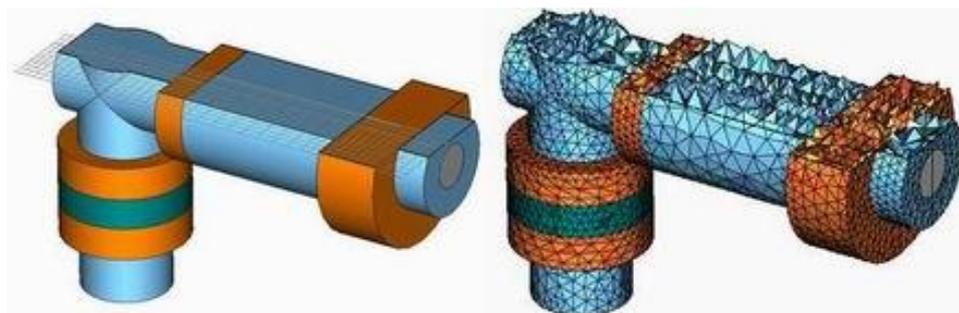


Рис. 1. Использование тетраэдральной сетки

Перспективные САПР печатных плат

САПР фирмы MENTOR GRAPHICS

САПР Mentor Graphics позволяет провести полный цикл верификации платы. При этом используются следующие подсистемы:

- HyperLynx, ICX/Tau, Quiet Expert – анализ целостности сигналов и электромагнитной совместимости;
- BetaSoft Board – анализ теплового режима печатного узла;
- IDF Interface – двунаправленный интерфейс в САМ/CAD
- Fablink XE/Pro – пост-обработка для повышения технологичности производства.

Пакет HyperLynx – наиболее мощный в области анализа целостности сигнала. Он имеет модули предтопологического (HyperLinks LineSim) и посттопологического (HyperLinks BoardSim) анализа (см. выше), тесно взаимодействующий с системой контроля ограничений.

Пакет ICX выполняет верификацию целостности сигнала, обеспечивая анализ высокой точности, в том числе наихудшего случая. Анализ может производиться для многослойных систем в интерактивном и пакетном режимах. Важной особенностью является возможность анализа размещения компонентов и трассировки по электрическим требованиям.

Пакет Tau выполняет исчерпывающую временную верификацию до и после трассировки платы.

В Mentor Graphics Design Kit имеются готовые блоки и библиотеки моделей компонентов, которые используются для анализа целостности сигнала. Это модели Spice, IBIS, VHDL-AMS и другие, поставляемые изготовителями микросхем.

САПР фирмы CADENCE

Следующей по мощности предлагаемых решений идет компания CADENCE. Для верхнего уровня проектирования предлагается пакет PCB Design Studio. В качестве редактора печатных плат здесь используется программа Allegro, позволяющая разрабатывать многослойные и высокоскоростные с высокой плотностью размещения компонентов. В качестве штатного модуля авторазмещения и автотрассировки здесь используется программа SPECCTRA, управляемая обширным набором правил проектирования и технологических ограничений. Анализ целостности сигнала и ЭМС топологии платы выполняется с помощью специального модуля SPECCTRAQuest SI Expert, а для предварительного анализа проекта и подготовки наборов правил проектирования используется модуль SigXplorer.

САПР фирмы ZUKEN

Третьим по популярности в мире является достаточно мощный продукт – Visula компании ZUKEN. Продукты этой компании обеспечивают сквозной цикл проектирования и предлагают эффективные средства моделирования и синтеза программируемой логики с последующей разработкой печатной платы. Здесь имеется стандартный набор инструментария, а также собственные средства авторазмещения и автотрассировки. Следует отметить, что компания ZUKEN также предлагает пользователям интегрированные средства трехмерного твердотельного моделирования разрабатываемых устройств.

САПР фирмы ALTIUM

В 2002 году компания ALTIUM выпустила в свет пакет Protel DXP, представляющий собой продолжение собственной оригинальной линии продуктов Protel. Этот пакет обеспечивает сквозной цикл проектирования смешанных аналого-цифровых печатных плат. Весь инструментарий реализован на базе интегрированной среды проектирования Design Explorer,

работающей под управлением операционной системы Windows XP. К имевшимся ранее средствам посттопологического анализа целостности сигналов добавилась возможность выполнять предтопологический анализ (рис. 2). Но главным новшеством системы Protel DXP должен был стать топологический автотрассировщик Situs, призванный реализовать новый подход к автоматической разводке плат.

САПР Quantic EMC

Compliance – система посттопологического анализа электромагнитной совместимости на печатных платах. Пакет Compliance позволяет оценивать влияние конструктивных особенностей печатных плат на их электрические характеристики (рис. 3), а также моделировать электромагнитную совместимость устройств ещё до изготовления реальных конструкций, тем самым сокращая сроки и стоимость проектирования при значительном повышении качества.

Целостность сигнала с учетом технологических факторов

Проектирование высокоскоростных плат требует построения адекватных моделей для анализа целостности сигнала и ЭМС. Уровни достигнутого быстродействия повышают чувствительность конструкции к различного рода вариациям материалов, размеров элементов конструкции и характеристик компонентов. Появление новых материалов, развитие технологии микропереходов, увеличение разрешающей способности и другие технологические факторы способствуют получению всё более совершенных конструкций плат. При этом происходит уточнение моделей которые подлежат анализу. Так, если для относительно низкочастотных плат расчет емкости между проводниками можно проводить по упрощенным выражениям, которые не учитывают толщину проводников, то при сближении значений зазоров между проводниками и их толщины учет последнего параметра становится обязательным.

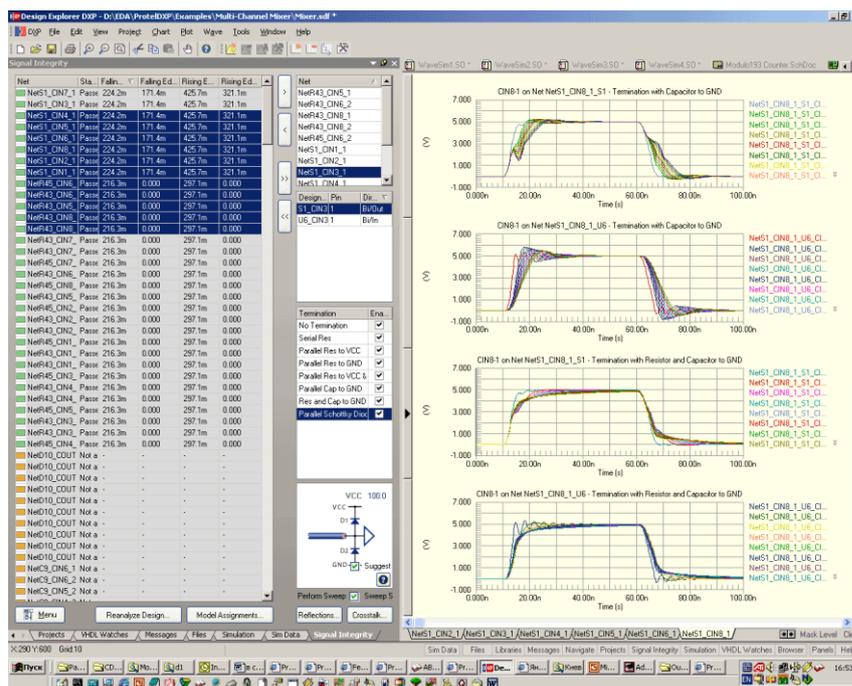


Рис. 2. Анализ целостности сигнала

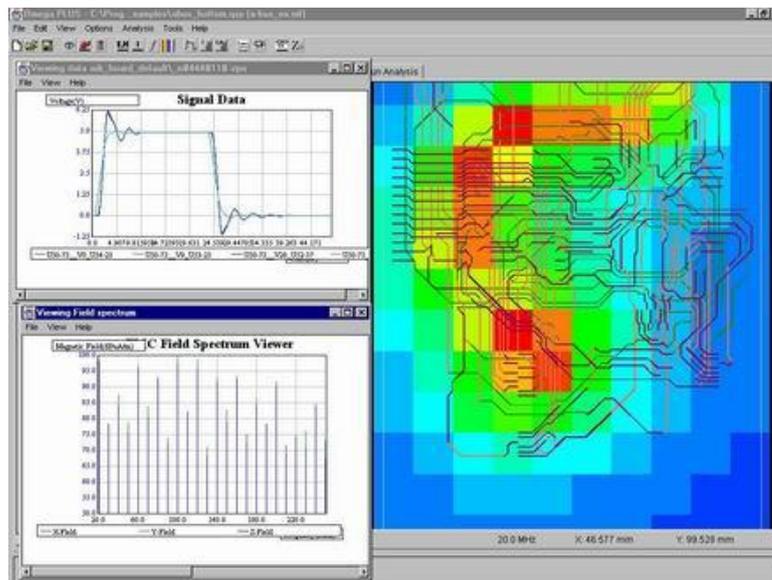


Рис. 3. Интерфейс анализа целостности сигнала в системе Compliance

Так как на заключительном этапе проектирования следует применять как можно более адекватные модели и методы расчета, обеспечивающие максимальную точность, то в подавляющем большинстве случаев таким расчетным инструментом являются солверы электрических и магнитных полей или электродинамических задач.

Одной из актуальных задач оценки влияния технологических факторов на электрофизические параметры платы является оценка влияния влагозащитного покрытия на электрические параметры микрополосковой линии передачи. При нанесении влагозащитного покрытия формируется заглубленная линия передачи, диэлектрическая среда которой становится кусочно-однородной, состоящей из четырёх сред: воздух – паяльная маска – лак – диэлектрик. Точное определение электрических параметров такой линии передачи возможно только численным методом. Для этих целей используется солвер ELCUT [4], который является программой моделирования двумерных полей методом конечных элементов. Она разработана и представлена на рынке петербургской компанией TOP.

Спектр задач, решаемых данной программой, очень широк: электростатика, электрическое поле постоянных и переменных токов, магнитостатика, магнитное поле синусоидальных токов и нестационарное магнитное поле, стационарное и нестационарное температурное поле, а также упруго напряженное состояние.

Для анализа влияния конструкции печатного узла на электрофизические параметры линии передачи строится модель, которая представляет собой сечение печатного узла: стеклотекстолитовая подложка с металлическим слоем заземления на нижней стороне, проводником на верхней стороне, а также слоями паяльной маски и влагозащитного покрытия (рис. 4).

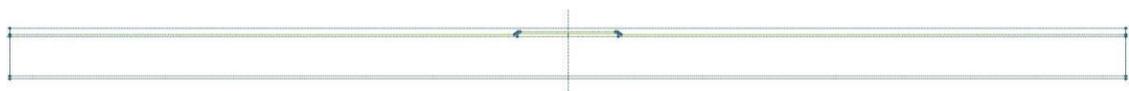


Рис. 4. Модель в программе ELCUT

Для решения задачи необходимо построить сетку конечных элементов. ELCUT использует единственный тип конечного элемента – треугольник первого порядка. Генератор сетки может работать полностью автоматически, либо учитывать пожелание пользователя по сгущению или разрежению сетки в отдельных участках модели. В расчетах электрических параметров описываемой модели сетка конечных элементов генерировалась автоматически (рис. 5). Среднее количество узлов сетки – 50000.

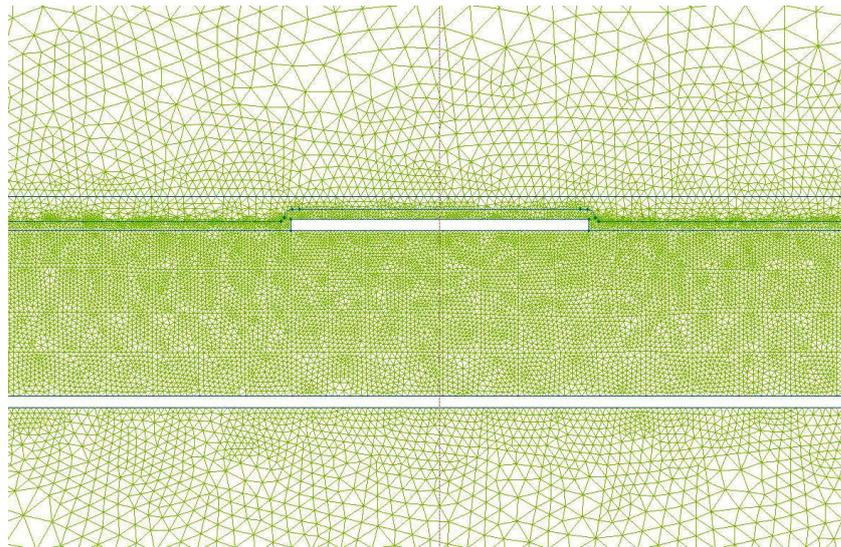


Рис. 5. Вид сетки конечных элементов вблизи проводника

В качестве примера расчета по данной методике приведено исследование влияния величины диэлектрической проницаемости подложки печатной платы.

Разница между максимальным и минимальным временем задержки распространения сигнала при изменении диэлектрической проницаемости печатной платы от 4 до 5,5 составила 0,85812 нс/м (рис. 6).

Как показывают расчеты, электрофизические параметры в зависимости от диэлектрической проницаемости и толщины материала могут меняться в широких пределах.

Поскольку свойства одного и того же материала могут меняться от производителя к производителю и от партии к партии, а толщина покрытий может варьироваться в зависимости от методов нанесения, при разработке сложных быстродействующих электронных модулей требуется особенно внимательно относиться к возможному влиянию этих факторов на электрофизические параметры линии связи. Внесение коррективов в проект всегда сопряжено с дополнительными инвестициями. Имея мощное, но вместе с тем легкое в применении, программное обеспечение и проверенный метод расчета, изменение электрофизических параметров можно отслеживать еще на этапе проектирования электронного модуля, что позволит минимизировать как материальные, так и временные затраты.

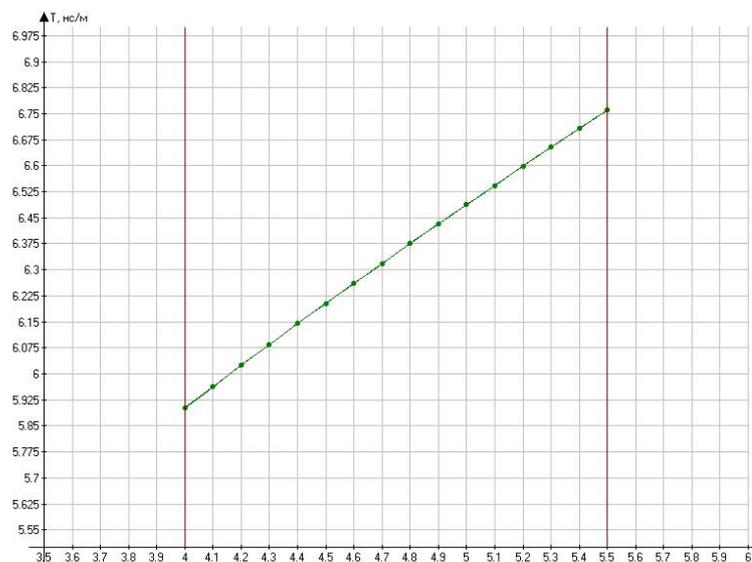


Рис. 6. Влияние диэлектрической проницаемости подложки печатной платы на время задержки распространения сигнала

Задача моделирования цифровых узлов и систем может быть решена на основании моделей интегральных микросхем, составленных разными способами. В зависимости от подхода и метода составления моделей они имеют разное назначение, сложность и точность описания электрических свойств и логики функционирования. Рассмотрим основные подходы к представлению информации о цифровых узлах и микросхемах, на основании которой проводят моделирование цифровых узлов. Это язык описания электронных схем SPICE, языки спецификации логических систем VHDL и AHDL и формат IBIS представления данных об электрических свойствах цифровых интегральных схем (ЦИС).

VHDL (Very high speed integrated circuits Hardware Description Language) – этот язык описания логических систем является фактически международным стандартом в области автоматизации проектирования цифровых систем. Это входной язык многих современных САПР как заказных, так и программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) и программируемых пользовательских матриц. VHDL предназначен, в первую очередь, для спецификации – точного описания проектируемых систем и их моделирования на начальных этапах проектирования – алгоритмическом и логическом. С помощью VHDL можно моделировать схемы с учетом реальных временных задержек.

Языки **AHDL** и **VHDL** очень похожи как по командному базису, так и по возможностям описания цифровых систем и ПЛИС. Отличие между ними состоит в том, что VHDL создавался как язык описания цифровых устройств вообще, а AHDL ориентирован на ПЛИС и другие микросхемы фирмы Altera. Это значит, что он имеет более узкую «специализацию», но, поскольку был создан для микросхем с определенной архитектурой, то позволяет наиболее полно использовать её особенности.

Язык и система **SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)** были созданы более двадцати лет назад. Язык предназначен для описания электрических цепей разной сложности, и он используется для расчета схем во временной и частотной областях, а также в статическом режиме. При проведении моделирования все элементы схемы заменяются их математическими моделями. Таким образом SPICE-модели являются полными.

Язык SPICE и системы на его основе используются во многих САПР; существуют разные их модификации. Например, в системе OrCAD 9.2 используется программа PSPICE. Помимо PSPICE существуют и другие программы : WinSPICE (некоммерческая программа, распространяется свободно), HSPICE, XSPICE и др. Языки, используемые во всех системах, имеют значительные отличия и дополнения по сравнению с изначальной версией SPICE.

Главной трудностью, возникшей на пути полного схемотехнического моделирования цифрового узла на основе SPICE-моделей составляющих его элементов, является отсутствие в свободном доступе принципиальных электрических схем, тем более с номиналами пассивных и характеристиками активных элементов. Напротив, большинство крупных фирм старается сохранить эту информацию в тайне (особенно для новых разработок).

Поэтому в настоящее время производители микросхем практически прекратили распространение их SPICE-моделей. Всё большее развитие получает новый подход к моделированию микросхемы, основанный на IBIS-описании.

IBIS (I/O Buffers Information Specification) – информационная спецификация буферов ввода/вывода.

Моделирование цифровых узлов с позиций целостности сигнала в ЭМС оказывается весьма непростой задачей. Для её решения необходимо использовать новый подход. Специалисты остановились на формальных макромоделях микросхем, и результатом их работы стало появление нового типа моделей – IBIS [5].

Сущность IBIS заключается в том, что в спецификации приводится описание свойств только входных и выходных буферов ЦИС, причем под буфером понимается часть схемы, непосредственно связанная с тем или иным сигнальным выводом. Распространение сигнала внутри микросхемы не моделируется.

В настоящее время наблюдается две важные тенденции в области IBIS. Первая из них – это массовый переход от SPICE к IBIS-моделям микросхем. Вторая заключается в том, что IBIS в своем развитии все больше сближается с VHDL и другими подобными языками. Файлы с IBIS-описанием микросхем могут быть дополнены VHDL-описанием логики её функционирования. Такое сочетание языков разного назначения в стандарте IBIS называют мультязычным расширением.

Рассмотрены наиболее распространенные подходы к моделированию цифровых узлов, каждый из которых применим на определенных стадиях проектирования и дает точный результат при использовании по назначению. Все они имеют свои перспективы развития, преимущества и недостатки. Наиболее перспективным является совместное использование IBIS и VHDL для описания электрических свойств и логики функционирования микросхем, на основе чего можно проводить моделирование цифровых узлов на печатных платах на разных этапах проектирования.

Заключение

Проблема обеспечения ЭМС носит комплексный характер, что требует обеспечение необходимых требований на всех уровнях модульности при проектировании аппаратуры. Увеличение уровня модульности ведёт к увеличению затрат на обеспечение ЭМС и снижению доступных мер.

Обеспечение ЭМС достигается различными конструкторско-технологическими мерами, включающими выбор элементной базы, рациональную компоновку элементов, экранирование отдельных элементов схем, моделированием полей помехи элементов и т.д.

Отсутствие алгоритмов оптимального размещения ЭРЭ на плате с учётом обеспечения их ЭМС, громоздкость и сложность математического описания требуют использования различных САПР для быстрого и качественного проектирования электронных цифровых устройств.

Как видно из приведенного обзора, к сожалению, пока нет универсального продукта для анализа целостности сигналов и оценки параметров ЭМС. Таким образом, разработчик платы должен принять решение о целесообразности использования того или иного математического метода в каждом конкретном случае и затем сделать выбор рациональной программной среды, которая позволит провести анализ на основе выбранного метода. Наиболее оптимальным решением пока остается комбинированный метод использования нескольких программных продуктов при проектировании платы.

Список литературы

1. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры – М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. – 626 с.
 2. Уильямс Т. ЭМС для разработчиков продукции - М.: Издательский Дом «Технологии», 2003. – 520 с.
 3. Васильченко А., Схольц И., Де Раад В., Ванденбош Г. Качественная оценка вычислительных методов электродинамики на примере программных продуктов для высокочастотного моделирования микрополосковых антенн – EDA Expert, 3/2008.
 4. Дубицкий С., Поднос В. ELCUT – инженерная система моделирования двумерных физических полей – CADmaster, 1/2001.
 5. Кечиев Л.Н., Лемешко Н.В. Моделирование цифровых устройств с использованием IBIS-описания – М.: Изд-во МИЭМ, 2006. – 243 с.
-