

Современные инструменты проектирования микроэлектронных схем и систем на кристалле от компании ANSYS и ANSOFT. Обзор возможностей Ansoft Designer, HFSS, Q3D Extractor, SIWAVE

А.Н. Геттих

ЗАО "КАДФЭМ Си-Ай-ЭС", Andrey.Gettikh@cadfem-cis.ru

Аннотация — Данная статья посвящена обзору линейки современных программных средств разработки радиоэлектронных схем и систем, в том числе систем в упаковках и систем, монтируемых на один кристалл. С интеграцией программных комплексов электромагнитного и схемного моделирования от компании ANSOFT с пакетами конечно-элементного анализа от корпорации ANSYS, стал возможным комплексный междисциплинарный анализ изделий радиоэлектроники. Это касается всех этапов жизненного цикла - от технологического до эксплуатационного. Предлагаемая идеология моделирования построена на декомпозиции объекта анализа на разные уровни ответственности: *уровень систем, уровень схем и уровень компонентов*, физически реализующие то или иное ММІС изделие. В зависимости от модели и уровня ответственности, для задачи макетирования выбираются разные вычислительные модули электромагнитного и схемотехнического анализа. В рамках единой среды проектирования в виде ANSOFT Designer и ANSYS Workbench обеспечивается динамическая связь между моделями разных уровней абстракции и физики, необходимыми при анализе интегральных схем.

Ключевые слова — ANSOFT Designer; ANSYS; ICEpak; SIWave; HFSS; Q3D Extractor; метод конечных элементов, SPICE-модели.

I. ВВЕДЕНИЕ

При переходе гражданских систем телекоммуникации в миллиметровый частотный диапазон предлагается реализовать его огромный потенциал за счет большей емкости каналов, высоких скоростей передачи данных (вплоть до нескольких десятков гигабит в секунду). Кроме того, открываются новые возможности для медиа приложений на мобильной платформе: высокоскоростному интернету, потоковому видео, персональным беспроводным сетям и т.п. В частности, выделение для освоения без обязательного лицензирования в различных странах полос частот из миллиметрового диапазона дало возможность интенсивней осваивать проектировщикам гражданских коммуникационных систем диапазон в районе 60ГГц. Хотя традиционно миллиметровые частоты вначале осваивали для военных нужд (спутниковые средства связи, радары, навигация и т.п.), для гражданского применения этот диапазон также представляет существенный интерес. С

другой стороны, современные полупроводниковые технологии за счет высокой плотности компоновки интегральных элементов на кристалле позволяют скомпоновать в едином корпусе законченное функциональное изделие микроволнового применения. Уже имеются технологии, реализующие монолитные интегральные схемы с техпроцессом 0.25мкм и 0.15мкм (см. [2]-[6]) и рабочими частотами вплоть до 100ГГц. Как правило, это подложки на AsGa или на тройных полупроводниках. Такие высокочастотные интегральные схемы содержат в едином корпусе как активные цепи (малошумящие усилители, смесители с гетеродинами, ГУН и др.), так и пассивные элементы (цепи коррекции и настройки, делители, фильтры, фазовращатели и др.). Компоновка активных и пассивных узлов в единый корпус позволяет создать единое, функционально законченное изделие, получившее название *монолитная интегральная схема миллиметрового диапазона* (англ. ММІС - monolithic microwave integrated circuit). Такие схемы обладают значительным преимуществом по сравнению с традиционными СВЧ цепями за счет малого энергопотребления и малых габаритов.

Сложные схемные решения и субмикронные технологии, наряду с высокими темпами разработок, заставляют проектировщиков микроволновых систем интенсивно использовать современные средства компьютерного моделирования с целью минимизации отладочных работ и возможного сокращения время макетирования. Согласно маршрутам проектирования, подробно рассмотренным в статье [1] и поддерживаемым крупными производителями средств автоматизированного проектирования, такими как Synopsys, Mentor Graphics, Cadence Design System, разработчикам необходимо по возможности проводить законченный анализ изделий РЭА, в том числе на уровне физических прототипов. Желателен также полный анализ всего изделия РЭА, начиная с уровня СБИС в упаковках, и далее с учетом объемных моделей печатных плат и разъемов до законченных функциональных модулей в стойках шасси. Для ММІС изделий это особенно актуально, поскольку требования к интегральным элементам по надежности и стойкости всегда были особенно высокие. Это касается как изделий гражданского применения, так и военной тематики.

Для специалистов в области СВЧ микроэлектроники и техники на рынке существует несколько крупных коммерческих программных пакетов, позволяющих провести электромагнитный и схемотехнический анализ СВЧ цепей и схем. Среди таковых можно выделить пакеты AWR Microwave Office и CST Design System, Agilent ADS и EMPro. Данную линейку можно расширить и дополнить продуктами от американской компании ANSOFT, такими, как Designer, Maxwell, HFSS, Q3D Extractor, SIWave, TPA. После вхождения компании ANSOFT в корпорацию ANSYS, программные комплексы электромагнитного моделирования HFSS, Q3D, Maxwell и пакеты анализа радиоэлектронных схем и систем Designer и Simplorer стали тесней интегрироваться в среду ANSYS Workbench. Это позволяет проектировщикам использовать конечно-элементные вычислительные технологии в области электромагнитного анализа от ANSOFT совместно с пакетами физического моделирования из смежных разделов физики от ANSYS. Программы от ANSOFT совместно с инструментами ANSYS Mechanical и ICEpak могут предоставлять проектировщикам возможность моделирования практически всех процессов, возникающих в разрабатываемых изделиях РЭА: электромагнитных, механических деформаций и разрушений, тепловых и газодинамических и т.п. Данная интеграция поддерживается автоматически для всех пакетов физического моделирования. Примечательно, что пакеты от ANSOFT также встраиваются в маршруты проектирования Zuken, Synopsys, Cadence, Mentor и поддерживают работу с Arache. В данной статье рассматриваются программы моделирования от компании ANSOFT, используемые для разработок микроволновых ИС и систем, построенных на их основе.

II. ЛИНЕЙКА ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ АНАЛИЗА СВЧ ИС

Традиционная методика моделирования предусматривает разделение анализируемого радиоэлектронного изделия на три уровни абстракции: *уровень физических компонентов, уровень цепей и схем и системный уровень*. Этапы проектирования СВЧ ИС, как правило, состоят из схемотехнического анализа разрабатываемых цепей и электромагнитного анализа топологий и упаковок. К примеру, на уровне схемотехники при разработке СВЧ усилителя проектировщик определяет, в частности, число каскадов и задание смещения рабочей точки, проектирует настроечные цепи и цепи питания, вычисляет КПД устройства, максимально реализуемый КУ и т.п. На уровне топологии уже необходимо выполнить высокоточную компоновку элементов схемы по кристаллу, упаковать чип в корпус ИС и произвести законченный анализ СВЧ интегральной схемы уже с учетом наводок и перекрестных искажений. Последнее особо актуально для высоких частот.

Разработчикам для каждого из уровней абстракции компания ANSOFT предлагает инструменты моделирования, удовлетворяющие, в том числе, следующим требованиям:

- интеграция с основными EDA-пакетами разводки многослойных печатных плат; упаковок интегральных схем;
- поддержка нейтральных графических форматов и форматов основных CAD-программ;
- поддержка обширной библиотеки современных поставщиков радиоэлектронных компонентов и материалов;
- поддержка моделей современных технологических норм;
- проведение комплексного статистического анализа, анализа на чувствительность и робастность;
- возможность проведения ресурсоемких высокопроизводительных расчетов с распараллеливанием и декомпозицией расчетных областей по вычислительным узлам. Поскольку различают частотные, временные и координатные области анализа пакеты от компании ANSOFT предусматривают проведение вычислений с разделением расчетных областей по вычислительным узлам и затем корректную сборку результатов;
- создание отчетности и верификация разрабатываемых моделей.

Уровень пассивных компонент представлен такими элементами в интегрированной радиоэлектронной системе, как упаковка ИС с трассировками по корпусу, выводы ИС, разъемы, коннекторы, межплатные и межкорпусные соединения, межслойные переходы и другие пассивные элементы. Данные элементы изделий РЭА могут интенсивно использовать современные сложные материалы: композитные, дисперсионные, изотропные и анизотропные. Соответственно, широкая номенклатура материалов должна поддерживаться в пакетах электромагнитного моделирования на физическом уровне абстракции. В частности, программы HFSS, Q3D Extractor, построенные на методе конечных элементов, позволяют анализировать в частотной области электромагнитные процессы для пассивных элементов со сложными геометриями и материалами. Аналогичные библиотеки материалов поддерживают модуль планарного электромагнитного анализа PlanarEM, встроенный в пакет ANSOFT Designer, и частично гибридные вычислительные модули метода конечных элементов и метода моментов в пакетах SIWave и TPA.

Для уровня абстракции радиоэлектронных схем и систем ANSOFT предлагает пакет Designer, который позволяет проводить моделирование радиоэлектронных изделий в частотной и временной областях. Для учета электромагнитных процессов, происходящих на уровне физической модели, поддерживается интеграция конечно-элементных моделей из пакетов HFSS, SIWave, Q3D Extractor по динамической ссылке в объекты Designer.

На рис. 1 представлен краткий список пакетов от компании ANSOFT, необходимый для проектирования

интегральных СВЧ схем. Приведен как список инструментов для уровней абстракции схем и систем, так и уровня электромагнитного анализа физической модели.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ АНАЛИЗ	СИСТЕМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
HFSS 3D полноволновой ЭМ анализ структур. Извлечение SYZ параметров, анализ импедансов, КСВН, постоянных распространения, полей в ближней/дальней зонах, резонансов, ДЧ, поверхностных токов и полей.	Ansoft Designer RF&SI Моделирование цепей, схем и систем (в том числе: микроволновых, высокоскоростных и гибридных аналоговых, цифровых и смешанных). Построен на вычислительном ядре NEXXIM: • Встроенный планарный ЭМ решатель, утилита создания фильтров и анализа Touchstone - моделей; • Связанная иерархическая модель топологии и схем • Работа с моделями в NetList - форматах; • Поддержка технологии "SoD" и "Co-Simulation" для динамического подключения моделей полевого ЭМ анализа;
Full Wave Spice Высокочастотные зависимые SPICE-модели. Поддержка HSPICE, PSPICE, SpectreRF, Matlab	Nexxim Вычислительное ядро программы DESIGNER для анализа во временной, частотной областях, статистического моделирования на переходные процессы и в цифро-аналоговых и гибридных схемах • метод гармонического баланса; • метод фазового пространства и теории свертки для построения EYE диаграмм; • Поддержка HSPICE, IBIS v4.0; Verilog-A, SpectreRF; SPICE-форматов; Matlab&Simulink
Q3D/Q2D Extractor Квазистатический анализ в 3D/2D ЭМ структур. Извлечение RLCC параметров структуры и создание их SPICE/IBIS/W моделей (в том числе HSPICE, SpectraRF...)	Дополнительные утилиты AnsoftLinks Интерфейс между сторонними CAD пакетами: ECAD : Cadence, Zuken, Mentor, Synopsys, Altium, ... MCAD : DXF/DWG, IGES, STEP, Pro/E, ...
PlanarEM (часть Designer RF) ЭМ анализ в 2.5D пассивных планарных структур. Анализ SYZ матриц в частотном диапазоне. Анализ полей в ближней/дальней зон и токов.	Optimetrics • Автоматическая оптимизация • Параметрический анализ • Анализ чувствительности • Статистический анализ
Slwave Полноволновой ЭМ анализ сборки ИС + ПП в 3D на проблемы S/P и E/H. Извлечение SYZ параметров модели, анализ на резонансы многослойной ПП, создание полноволновой SPICE модели. Использование в Задачах на определение наводки и SSN/SSO	
TPA (Turbo Package Analyzer) Квази-статический ЭМ анализ упаковки СБИС. Извлечение RLCC параметров и S-матриц; Создание SPICE/IBIS - моделей упаковок;	

Рис. 1. Программные продукты от компании Ansoft для проектирования ВЧ/СВЧ ИС и систем на их основе

Укажем кратко основные особенности перечисленных на рис. 1 программных пакетов.

1. ANSOFT Designer

Данный программный комплекс содержит в себе несколько вычислительных модулей и является развитием некогда популярного пакета Serenade. На рис. 2 приведена упрощенная диаграмма связей между модулями в системе ANSOFT Designer и сторонними пакетами разводки ПП и ИС.

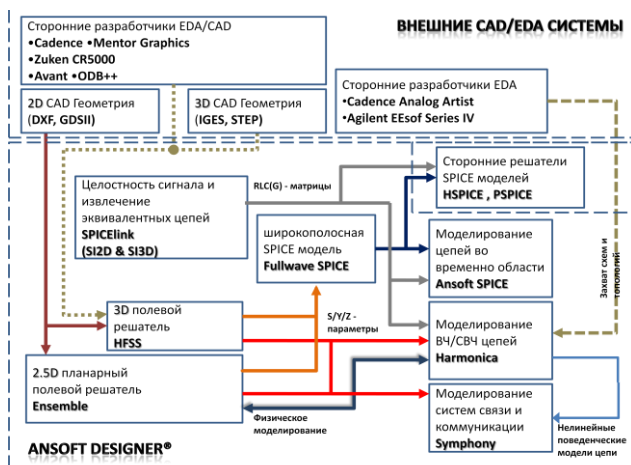


Рис. 2. Модули анализа, входящие в пакет ANSOFT Designer и взаимосвязь пакета со CAD/EDA-системами

Основным вычислительным ядром пакета Designer является система NEXXIM, построенная на SPICE технологиях. Она позволяет проводить нестационарный

анализ, моделировать линейные цепи во временной и частотной области (от 0 до сотен ГГц), проводить анализ нелинейных схем методом гармонического баланса, выполнять статистический анализ и оценивать переходные процессы методом быстрой свертки сигнала, строить звездные, фазовые и глазковые диаграммы и т.д. Схемы, моделируемые в системе NEXXIM, могут быть разбиты на подсхемы с разным уровнем вложения. Помимо системы NEXXIM, в состав пакета Ansoft Designer входят следующие модули:

- модуль Symphony, необходимый для анализа систем коммуникации и связи (как радиочастотных, так и оптических);

- модуль электромагнитного анализа планарных структур PlanarEM, построенный на вычислительном ядре Ensemble;

- система Harmonica, предназначенная для моделирования СВЧ схем.

ANSOFT Designer может анализировать цепи, представимые в виде схем и списка соединений (так называемые Netlist); поддерживать обширный набор библиотек: модели нелинейных элементов разных уровней, библиотеки пассивных, активных элементов и источников сигналов; работать с IBIS-моделями и схемами в виде SPICE, HSPICE и Spectra форматах. Также осуществляется интеграция с моделями, описанными на языках C и Nexsys Matlab.

Поддержка библиотек от сторонних производителей радиоэлектронных компонентов позволяет разработчикам интегральных схем проектировать системы с учетом современных технологических норм. Например, динамические библиотеки от компании UMC предлагают проектировщикам ММІС на основе технологии рН15 с псевдоморфными транзисторами рНЕМТ спроектировать изделие в ANSOFT Designer вплоть до частот 60 ГГц (рис. 3). Имеется опыт применения библиотек от UMC для проектирования систем на кристалле по КМОП технологии с технологическим процессом 0.13мкм для CDMA телефонии, гигабитных конвертеров и других высокоскоростных систем с частотами работы вплоть до 100ГГц [2]-[3].

Развитие средств компьютерного моделирования позволило произвести интеграцию пакетов разных вычислительных методов в системе ANSOFT Designer. Так, можно выполнить моделирование послылойной электродинамической модели СВЧ схемы средствами модуля PlanarEM, или же по технологии "Solver-on-Demand" с помощью ядра пакета HFSS произвести анализ в трехмерной постановке. Данный аспект весьма значим для моделирования СВЧ интегральных схем, поскольку выполнение анализа пассивных и активных цепей для субмиллиметрового диапазона необходимо проводить уже с учетом паразитных характеристик цепей и распределенных электромагнитных эффектов как в объеме кристалла, упаковках ИС, так и их в сборках на платах. Подобные эффекты моделируются средствами пакетов электромагнитного анализа в

2D и 3D постановке, описание которых приведено в табл. 1.

Таблица 1

Виды анализа пакетов физического моделирования пассивных элементов СВЧ ИС

Программы ЭМ моделирования	Тип анализа	Геометрия (применение)
HFSS	Полно-волновый анализ	3D (элементы неоднородностей ПП и ИС, коннекторы, соединители, части упаковки ИС, ...)
SIWave		2.5D планарные (Сложные многослойные упаковки ИС, ПП)
TPA	Квази-статический анализ	3D/2D (элементы неоднородностей ПП, коннекторы, соединители, упаковки ИС, ...)
Q3D/Q2D Extractor		

Первоначально проект ANSOFT Designer микроэлектронного СВЧ изделия может быть проанализирован в схемном и топологическом представлении, причем между моделями в редакторе топологии и в редакторе схем имеется однозначная связь. Проектировщик может производить коррекцию топологии как непосредственно в 2.5D редакторе, так и управляя параметрами модели на схеме. Доступ к библиотеке материалов в редакторе слоев точно такой же, как и в пакетах 3D физического моделирования.

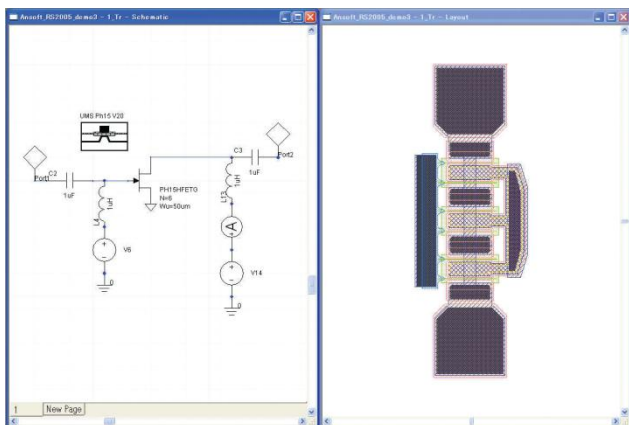


Рис. 3. Схема и соответствующая ей топология в Ansoft Designer. Представлена модель транзисторного усилителя на рHEMT PH15 из библиотеки UMC

При необходимости модель из вычислительного модуля PlanarEM может быть экспортирована в HFSS и полностью рассчитана в 3D постановке.

2. ANSYS HFSS

Широко известный пакет электромагнитного анализа пассивных конструкций в частотной области в диапазоне от килогерц до терагерц методом конечных элементов. Анализируемое изделие полностью моделируется в 3D. Модель элементов СВЧ ИС (трассировки по корпусу, упаковка чипа, различные выводы, межслойные соединения и т.п.) может быть импорти-

рована из CAD/EDA пакетов или передана из системы ANSOFT Designer. Так же, как и Designer, пакет HFSS интегрируется с пакетами разводки ПП и ИС от ведущих производителей программного обеспечения данного класса: Cadence, Mentor Graphics, ODB++ и Zuken. Благодаря модулю AnsoftLinks, встраиваемому в такие продукты от Cadence, как например, APD, Alegro и SiP Digital/RF или его аналоги, можно непосредственно из EDA-системы передать проект со всеми слоями в программы электромагнитного анализа от ANSOFT. При этом, управление стеком слоев, назначение портов и группировка трассировок возможно как автоматически, так и под управлением пользователя. Данный интерфейс свойственен не только пакету HFSS, но и модулю планарного электромагнитного анализа PlanarEM, пакетам SIWave, Q3D Extractor и TPA. Список сторонних EDA программ, с которыми напрямую осуществляется интеграция через утилиту AnsoftLinks, приведен в табл. 2.

Таблица 2

Программы проектирования СБИС, с которыми осуществляется интеграция ANSOFT продуктов с помощью модуля AnsoftLink - ECAD Translator

	Пакет	Версия для ОС Windows
Cadence	Allegro; APD; SiP Digital/RF; Virtuoso	16.0 - 16.3 и 16.5 16.0 - 16.3 и 16.5 4.46, 5.0, 5.0.32 и 6.x
Mentor Graphics	Expedition; BoardStation XE; BoardStation; PADS	v2005, v2007.x v8.x PADS PowerPCB v5.2a, v2005 и v2007
ODB++	Altium Designer Mentor Expedition Zuken Cadstar Sigridy UPD	R10 EE7.9.1 и более v12.1 * v11.0 *
Zuken*	CR5000	9.x и более

*Примечание: данная опция имеет ограничение.

В современной версии HFSS позволяет также проводить нестационарный анализ во временной области методом Галеркина с прореживанием шага по времени (DGTD-метод), при этом используется конечно-элементная неструктурированная сетка, свойственная всем пакетам физического моделирования от ANSOFT. Среди улучшений, появившихся в HFSS 14 версии и значимых для проектирования MMIC изделий, можно выделить следующие:

- модели шероховатости типа Huray и Grosse в виде граничных условий (рис. 4);
- осуществляется группировка трассировок по платам и упаковкам СБИС в Net-группы (рис. 5);
- при анализе в нагруженном режиме, традиционном для моделирования цифровых и аналоговых систем, может быть также произведена калибровка дискретных портов для учета их конечных размеров;
- при моделировании в широкой полосе частот можно задать принудительное изменение итерационного

базиса для обеспечения сходимости и выполнения условия пассивности.

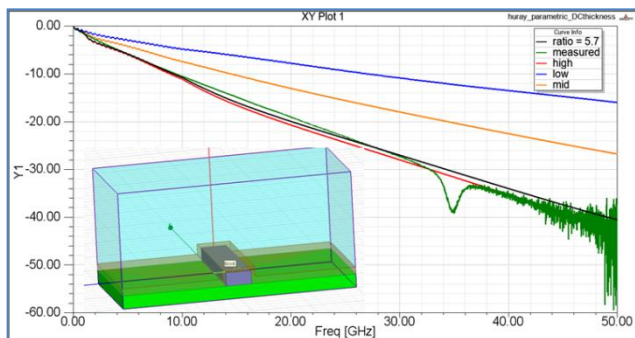


Рис. 4. Модель шероховатости Nugay в виде граничных условий конечной многослойной проводимости в системе HFSS

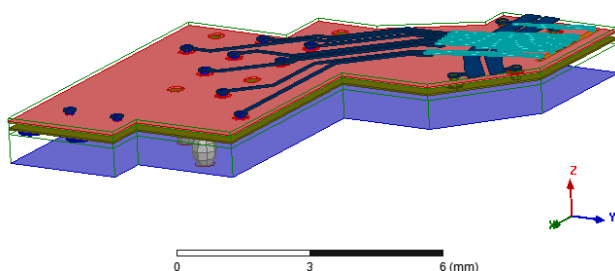


Рис. 5. Часть корпуса ИС, анализируемая средствами HFSS

3. ANSYS Q3D Extractor

Для тех задач, где необходимо получить эквивалентные параметры цепи на основе анализа электромагнитного поля в 2D/3D структурах, применяется инструмент Q3D Extractor™. Данный программный продукт предназначен как для извлечения RLCG-матриц и W-элементов, так и для построения SPICE-моделей, с целью последующей передачи их в систему ANSOFT Designer. Q3D Extractor извлекает паразитные параметры цепи исходя из типа элемента эквивалентной схемы замещения и AC/DC режимов расчета. Соответственно, его ядро построено на нескольких вычислительных методах. Для DC-RL режима - FEM решатель (Finite Element Method, МКЭ), а для AC-RL режима – BEM решатель (Boundary Element Method, метод граничных элементов).

4. ANSYS TPA

Для экстракции RLCG-параметров более сложных многослойных структур предназначен пакет TPA. Его объектами анализа могут быть упаковки ИС. Помимо SPICE моделей он может формировать IBIS модели упаковок СБИС.

5. ANSYS SIWave

Для электромагнитного анализа сложных многослойных конструкций ПП и ИС традиционные пакеты, построенные только на методе конечных элементов в

3D, не подходят. Для таких задач, как анализ влияния электромагнитного поля на распространение сигнала по системам проводников в сложных многослойных упаковках ИС и ПП, оценка паразитных резонансов, падения напряжения на системах питания, извлечения SYZ-параметров и т.д., более подходит пакет SIWave. Электромагнитный анализ в частотной области осуществляется гибридом МоМ и FEM.

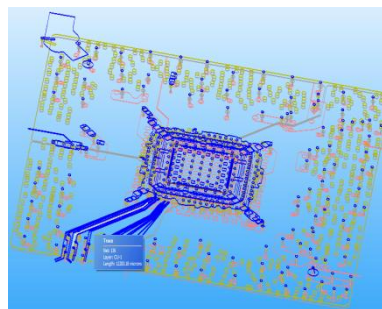


Рис. 6. Объектом анализа пакета SIWave являются сложные многослойные конструкции, такие как упаковки ИС и печатные платы

Анализируемое изделие полностью моделируется в трехмерном виде с учетом источников сигналов и РЭ компонент, подключаемые к портам модели. Модели СВЧ ИС, как по отдельности, так и в сборе с ПП, могут быть импортированы из CAD пакетов или переданы из систем EDA (см. табл. 2) посредством AnsoftLinks. Примечательно, что окончательный анализ всей системы на целостность сигнала в комплексе осуществляется с использованием среды Ansoft Designer, в которой к SIWave модели подключаются как N-полюсники нагрузки, задаются формы и типы источников сигналов, описываются нелинейные и линейные схемы, а также осуществляется постпроцессорная обработка данных.

III. МЕТОДОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЭА ИЗДЕЛИЙ ИНТЕГРАЛЬНОГО ТИПА СРЕДСТВАМИ ANSOFT И ANSYS

Процесс проектирования высокочастотных схем, как и современных высокоскоростных систем плотной упаковки, тесно связан с задачами электромагнитной совместимости. На высоких частотах начинают сказываться паразитные эффекты из-за распределенных параметров цепей, их взаимного влияния друг на друга. Проявляется дребезг, паразитные наводки и помехи от соседних линий, как при коммутациях, так и целенаправленного происхождения. В таких системах особенно актуален вопрос целостности сигнала (SI – Signal Integrity) и целостности питания (PI – Power Integrity). Поэтому полный электромагнитный анализ проектируемого изделия должен осуществляться с учетом паразитных эффектов, существующих в радиочастотных интегральных цепях, с учетом их корпусирования, наличия межслойных переходов и разъемов. На диаграмме рис. 7, построенной по материалам [3]-[9], показан процесс передачи данных из EDA/CAD-пакетов от сторонних разработчиков в программы физического и схемного моделирования для анализа радиоэлектронных систем.

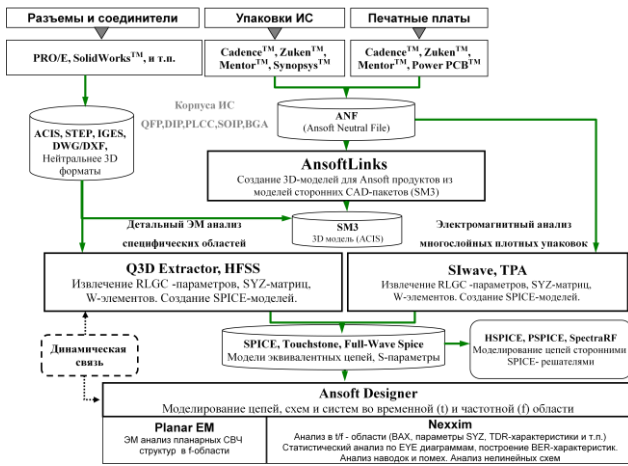


Рис. 7. Диаграмма моделирования Ansoft систем плотной упаковки

Примерный вид проекта в среде Ansoft Designer, показывающий идеологию моделирования схем с физическими моделями компонентов, показан на рис. 8. В данном случае анализируется прохождение битовой последовательности.

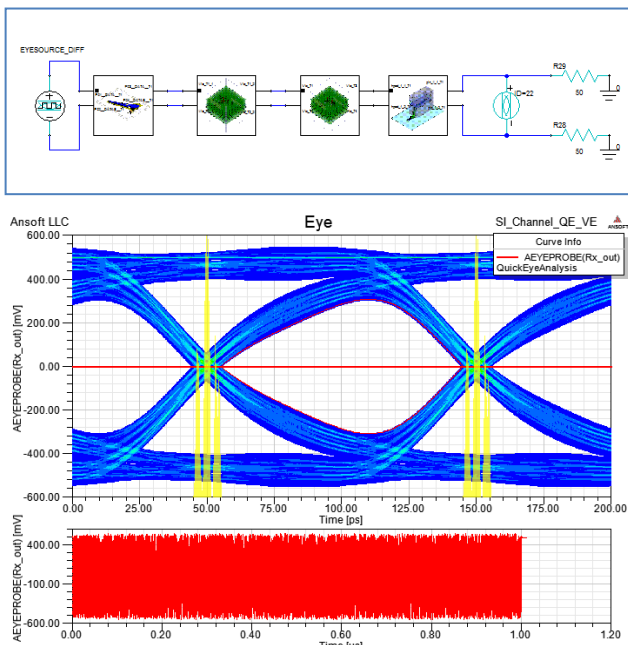


Рис. 8. Анализ прохождения битовой последовательности по каналу. Приведена т.н. EYE-диаграмма, а также временные диаграммы в некоторой контрольной точке

Законченный процесс проектирования изделий РЭА не будет полным без анализа на тепловое и механическое состояние. Для этих целей компания ANSYS предлагает следующую группу инструментов: ICEPak - специализированный пакет для расчета теплового состояния аппаратуры; ANSYS Mechanical – программа расчета деформаций по данным тепловых нагрузок. Все модули как электромагнитного, так и механико- и газодинамического анализа, работают из-под единой среды ANSYS Workbench. Диаграмма связей между

пакетами показана на рис. 9. Данные распределения джоулевых потерь из системы SIWave передаются напрямую в пакет ANSYS ICEPak, в котором тепловое состояние корпуса ИС и ПП моделируется уже с учетом теплопереноса и конвекционных процессов. Это дает возможность учесть режимы работы РЭ аппаратуры с учетом внешних факторов эксплуатации.

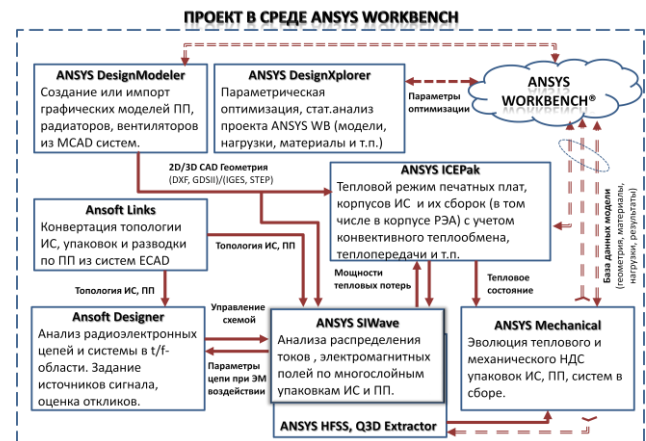


Рис. 9. Диаграмма связей между модулями анализа теплового и механического НДС с одной стороны, и пакетами электромагнитного анализа с другой, в среде ANSYS Workbench

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Новичков С.В. Тенденции развития средств автоматизированного проектирования систем на кристалле. // Сб. трудов IV Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем». 2010. С. 412 – 417.
- [2] 60 GHz Transceiver IC Design Using High-Mobility 0.15-micron GaAs Process // Copyright© Taiyo Yuden, UMS and Ansoft Corporation. TPS104-0906. 2006.
- [3] IC design and verification in flow for RF analog & digital integration // Copyright© UMS and Ansoft Corporation. TPSI01-0106. 2006.
- [4] Reference Flow for High-Speed Serial Interconnect // Copyright© Ansoft Corporation. 2005.
- [5] Millimeter-Wave MMICs and Applications. Thesis by Matthew Alexander Morgan. In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy // California Institute of Technology. 2003.
- [6] Microwave and Millimeter-Wave Integrated Circuit Systems in Packaging, Chenhui Jiang. 2010.
- [7] System In Package (SiP) and Stacked Package Solutions // Wayne Nunn, NXP Semiconductor & Denis Soldo, Ansoft Corporation.
- [8] RFIC DESIGN AND VERIFICATION // Copyright © UMC Corporation and Ansoft Corporation. TPSI01-0106. 2006.
- [9] Signal Integrity. Solution Guide // Being Heard. Above the Noise, XILINX. July 2005. Issue 1.
- [10] RFIC and MMIC design and technology / Edited by I.D.Robertson, S.Lucyszyn. The Institution of Electrical Engineers. 2009.