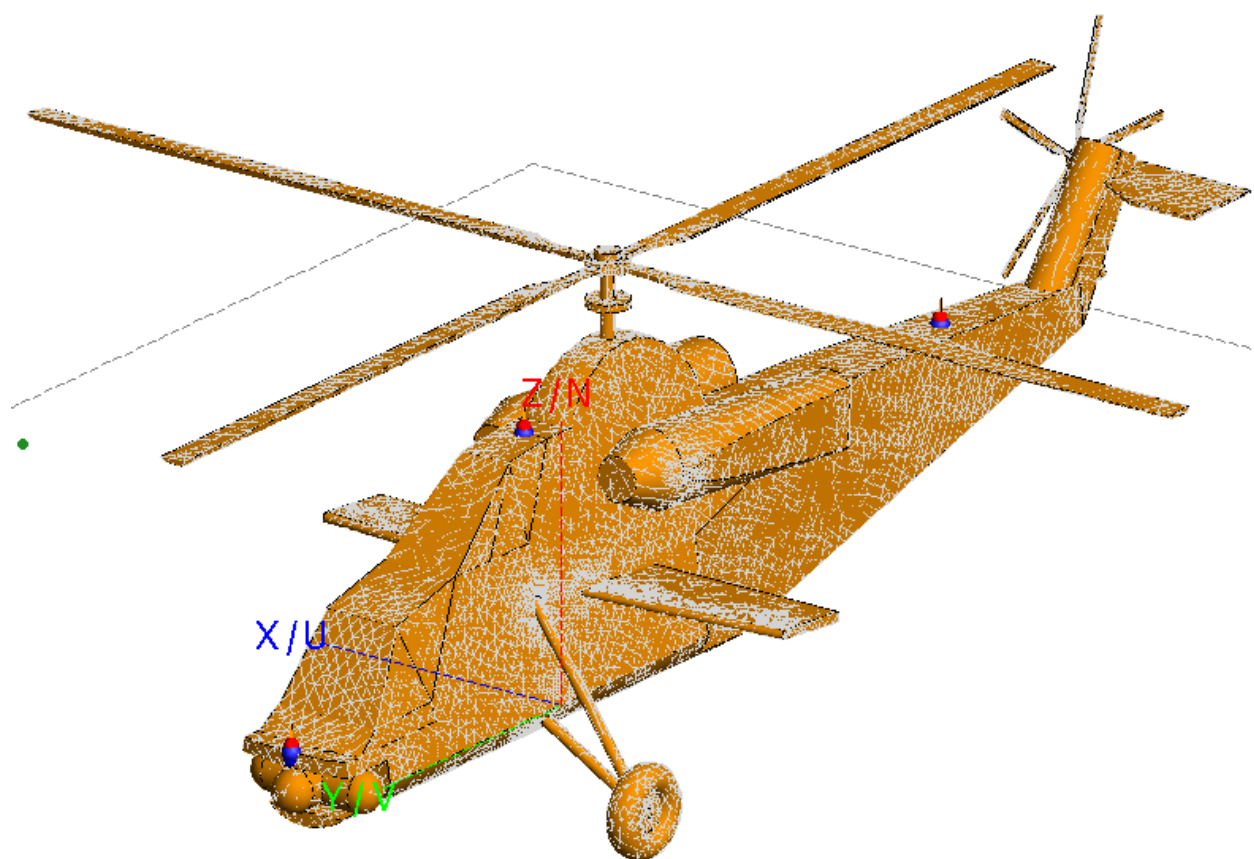


Банков С.Е., Курушин А.А.

История САПР СВЧ (1950-2010)



Москва 2016

УДК 621.3.049.77.029:681.3.06

Банков С.Е., Курушин А.А. История САПР СВЧ (1950-2010). – Москва, 2016, 90 стр.

Sergey Bankov, Alexander Kurushin. History Development of Microwave Design, Moscow, 2016, 90 pp.

Рецензенты: к.т.н. Давыдов А.Г., к.т.н. Лаврецкий Е.И.

Данная книга представляет собой обзор литературы, в котором излагается видимая авторами история развития САПР СВЧ. По открытым источникам показывается процесс развития отечественного программного обеспечения, а также параллельный процесс создания коммерческих продуктов на Западе.

Книга предназначена для широкого круга специалистов, студентов и аспирантов, изучающих проектирование СВЧ приборов и методы расчета электромагнитных полей в СВЧ структурах.

УДК 621.3.049.77.029:681.3.06

© Банков С.Е.

© Курушин А.А.

Оглавление

1. Введение	3
2. Этапы развития САПР	8
3. Развитие зарубежных САПР СВЧ	14
4. Разработка САПР СВЧ в СССР и СНГ	36
5. САПР СВЧ нелинейных схем	52
6. Средства проектирования и программные продукты последнего поколения	63
6.1. Программы, использующие метод конечных элементов	65
6.2. Программы, использующие метод конечных разностей во временной области (FDTD)	67
6.3. Программы, использующие метод моментов (FEKO)	69
6.4. Программа Comsol Multiphysics	71
Заключение	75
ЛИТЕРАТУРА	78

1. Введение

В последние десятилетия наблюдается интенсивное развитие систем автоматизированного проектирования (САПР) радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Эти системы различаются по типу проектируемой РЭА: цифровой, аналоговой и по диапазону частот, в котором функционирует РЭА: низкочастотный и сверхвысокочастотный (СВЧ). При этом можно отметить

возрастание роли СВЧ РЭА. Данная тенденция обусловлена большим количеством систем, функционирующих на СВЧ: мобильная связь, навигация (GPS, ГЛОНАС), спутниковое телевидение, телекоммуникационные системы, системы специального назначения и т.д. С другой стороны, многие вопросы функционирования низкочастотных систем, например, электромагнитная совместимость различных подсистем, должны решаться методами, характерными для диапазона СВЧ. Поэтому, если еще несколько десятилетий назад аппаратура СВЧ воспринималась почти исключительно как аппаратура специального назначения, то теперь это совсем не так. Такое расширение области применения СВЧ РЭА отразилось на развитии соответствующих САПР.

Начиная с девяностых годов прошлого столетия, стали появляться первые системы проектирования ориентированные на СВЧ диапазон (Touchstone, Libra). Они отличались сравнительной простотой математического обеспечения и текстовым описанием исследуемой схемы. Последующее развитие САПР РЭА СВЧ было связано с совершенствованием интерфейса пользователя, который постепенно приближался к графическому, а также с переходом к электродинамическому анализу устройства. Здесь можно упомянуть САПР Microwave Office фирмы Applied Wave Research, в которой сочетаются электродинамический анализ устройства (EM Sight) с его представлением в виде набора базовых элементов (Schematic). Следует отметить, что система Microwave Office содержит также практически полный набор инструментов, характерных для низкочастотной САПР, таких как нелинейный анализ схемы, ее оптимизация, анализ чувствительности, статистический анализ. Здесь видна тенденция к созданию интегрированных САПР, поддерживающих весь цикл проектирования РЭА вплоть до изготовления схемы. В ряду таких систем необходимо отметить Advanced Design System (ADS), содержащую блок электродинамического анализа ADS Momentum.



Рис. 1. Цикл проектирования от модели до реальной конструкции

Системы Microwave Office и ADS не являются в полной мере системами трехмерного электродинамического моделирования, так как они ориентированы на анализ исключительно многослойных печатных схем. Такие системы называют также 2.5 мерными системами. Максимальной универсальностью с точки зрения решения трехмерных задач электродинамики обладают такие системы как High Frequency System Simulator (HFSS) и Microwave Studio (MWS).

В современных САПР реализуются разные математические методы. Среди них можно отметить прямые методы решения граничных задач, такие как метод конечных элементов (МКЭ) и метод Finite Difference Time Domain (FDTD). Отличительной и наиболее привлекательной их чертой является универсальность, то есть возможность анализировать практически любую структуру. Платой за универсальность являются большие затраты компьютерных ресурсов. С точки зрения пользователя наиболее существенным недостатком является большое время необходимое для анализа СВЧ структур. Причина этого обусловлена дискретизацией пространства, лежащей в основе МКЭ и FDTD. Количество элементов

разбиения определяет размерность решаемой задачи и в случае МКИ и FDTD оно является максимально возможным из всех известных методов. Отметим, что МКИ используется в HFSS, а FDTD в MWS.

Альтернативным направлением в решении задач электродинамики являются не прямые методы. Среди них следует отметить метод моментов (МOM). Отличие его от упомянутых выше подходов состоит в том, что численное определение поля основывается на аналитическом решении некоторой ключевой задачи, а именно задачи о возбуждении структуры элементарным источником тока. Такое решение в математике получило название функции Грина. MOM оказывается эффективным, если функция Грина может быть записана аналитически в простой форме. В этом случае дискретизации подвергается уже не пространство, а лишь поверхность, что сильно снижает размерность задачи. К сожалению, функция Грина может быть достаточно просто найдена лишь для ограниченного числа структур. К ним можно отнести плоскостойкие структуры и свободное пространство. По этой причине именно для таких структур были разработаны САПР на основе MOM. Данный метод используется в следующих системах: Microwave Office, ADS, FEKO. К числу таких систем следует отнести отечественную разработку Электродинамика экранов из металла (ЭДЭМ).

Особое место среди задач, решаемых САПР РЭА занимают задачи излучения и рассеяния электромагнитных волн. Их отличие от задач анализа печатных или волноводных схем состоит в необходимости определения поля в области больших электрических размеров (под электрическим размером понимается отношение геометрического размера к длине волны в свободном пространстве). Дискретизация больших областей порождает задачи огромной размерности. Поэтому использование таких методов как МКИ и FDTD здесь заведомо неэффективно. Более того, часто оказывается неэффективным существенно более экономичный MOM. В этом случае строгие методы электродинамики необходимо дополнить, так называемыми,

асимптотическими методами: физической оптики (ФО), геометрической теории дифракции (ГТД) и т.д. Гибридные подходы, использующие ФО и ГТД, реализованы в системе FEKO.

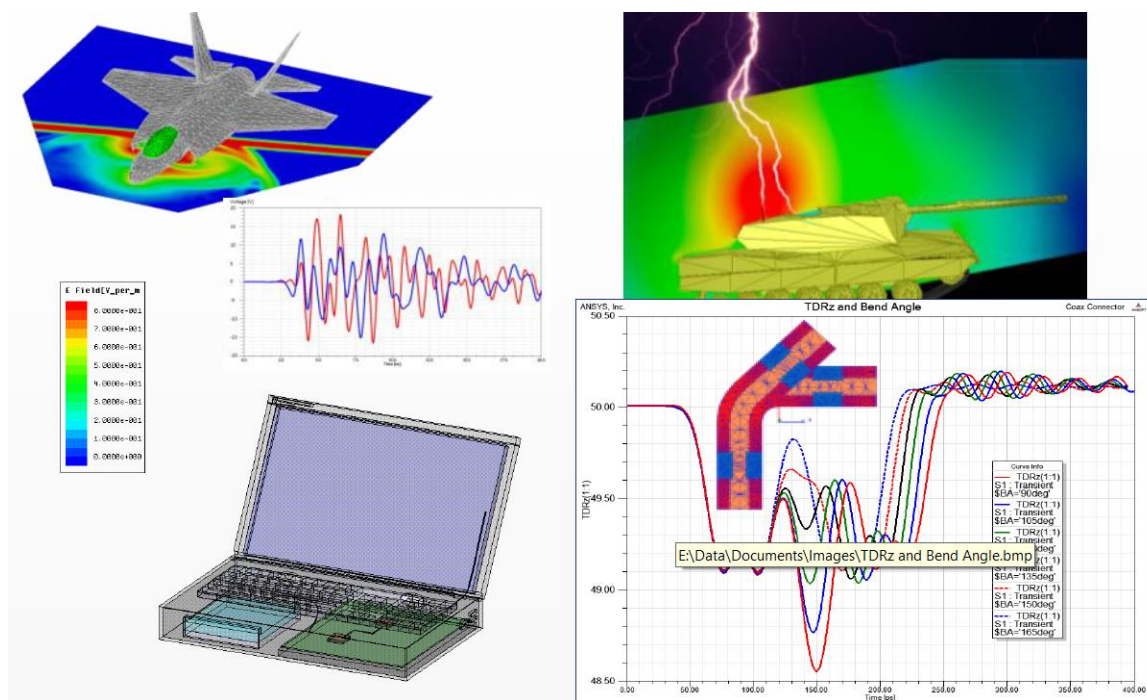


Рис. 2. Этапы моделирования и верификации решения задачи

Появление систем электродинамического моделирования и проектирования существенно изменило требования к уровню подготовки пользователя САПР. С одной стороны, кажется, что эти требования снизились, так как теперь проектировщик РЭА не обязан знать детали решения электродинамической задачи. С другой стороны, современные САПР СВЧ являются сложнейшими системами, функционирование которых существенным образом зависит от множества настроек и параметров, устанавливаемых пользователем. При этом данные настройки зависят от стратегии решения задачи и от требований к качеству решения, которые также определяет пользователь.

По этой причине пользователь, конечно, не должен знать все эти вопросы в деталях, но он должен иметь качественное представление об очень широком круге проблем прикладной электродинамики. При этом

можно совершенно обоснованно утверждать, что отсутствие знаний такого характера почти гарантированно приведет к неверному или в лучшем случае неоптимальному решению.

В настоящее время существует несколько книг, которые можно рассматривать в качестве пособий для пользователей САПР Microwave Office [1] и HFSS [2]. Однако эти пособия ни в коем случае не могут рассматриваться как альтернатива стандартным курсам электродинамики и техники СВЧ, которые позволяют получить действительно глубокие знания по данному кругу вопросов [3], [4], [5], [6]. Мы надеемся, что данная книга будет удобным дополнением к уже имеющейся литературе по САПР СВЧ РЭА [7-20], которое окажется полезным для студентов радиотехнических специальностей и инженеров, специализирующихся в области проектирования широкого класса устройств СВЧ и антенн.

2. Этапы развития САПР

Ускорение процесса проектирования радиоэлектронных устройств было актуально с момента появления сложных радиотехнических приборов, характеристики которых зависят от многих факторов: от геометрии, структуры, материалов.

Применение сложного математического аппарата в радиоэлектронике на определенных этапах развития сводилось к численным приближенным методам. В 20-30 годы в расчетах широко использовались справочные материалы, графические и номографические инструменты (диаграмма Вольперта-Смита), в сороковые годы – расчетные машины с жестко-перестраиваемым алгоритмом, в 50 годы – первые релейные, ламповые и полупроводниковые решающие машины стали использоваться для выполнения большого объема вычислений.

Считается, что термин САПР - система автоматизированного проектирования появился в 1950-х годах при разработке станков с программным обеспечением в Массачусетском Технологическом Институте (MIT) под руководством Douglas T. Ross (1929-2007) [21]. Применение появляющихся в те годы ламповых ЭВМ связывался с термином CAD (компьютерный дизайн), который ввел в оборот Ivan E. Sutherland [22]. САПР в те годы разрабатывались в большей части для черчения конструкций, использования машинной графики и разработки программ для станков с программным управлением.

В более поздний период содержание термина САПР существенно изменилось. Сейчас под САПР понимаются интегрированные системы, поддерживающие процесс проектирования радиоэлектронной аппаратуры на всех этапах от системного проектирования до анализа электромагнитных полей в сложных СВЧ структурах. Мы видим, что примерно за пятьдесят лет своего развития САПР прошли большой путь, который сопровождался рядом качественных изменений. Ниже мы рассмотрим основные этапы развития САПР.

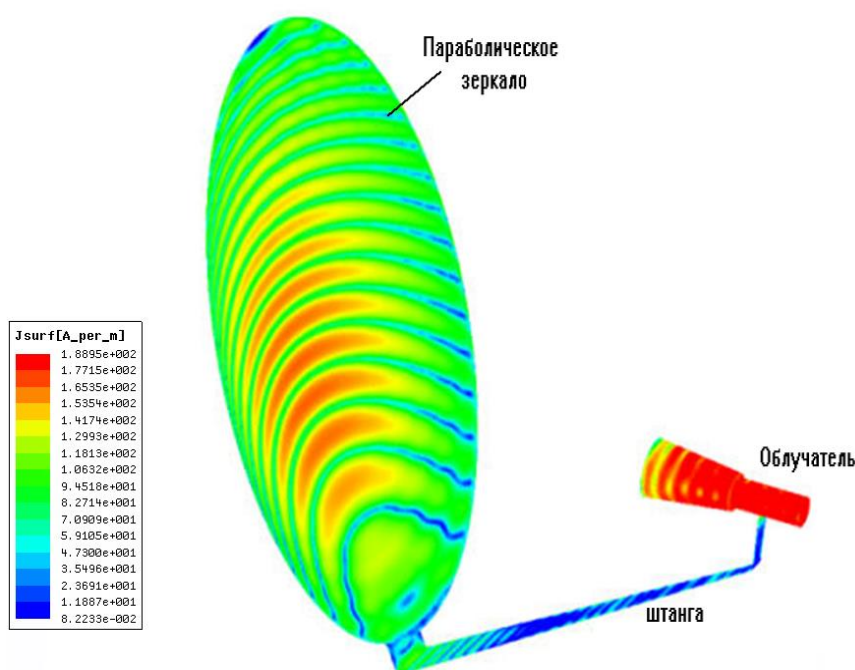


Рис. 3. Зеркальная антенна

Первые программы автоматизированного проектирования были созданы для нужд электронной и радиотехнической промышленности. Они появились в конце 50-х - начале 60-х годов прошлого века. В тот период основное внимание уделялось системам автоматизированного черчения. Разрабатываются методы оптимизации систем по заданным критериям.

В 60-е годы наблюдается широкое распространение машинных расчетов в области экономики и бухгалтерии, были разработаны алгоритмы решения систем линейных уравнений большого порядка. В эти годы начинается разработка САПР СВЧ устройств. Степень ее интенсивности возрастала по мере развития теории таких устройств и совершенствования вычислительной техники.

В 70-х годах были получены результаты, показавшие, что область проектирования поддается компьютеризации. В качестве примера можно назвать программы анализа электронных схем **Net-1**, **ECAP** или программу логического моделирования цифровой аппаратуры "**Seymour Cray**" (по имени изобретателя суперкомпьютера) и "**R.Kish**", созданные в США.

В 80-х годах внедрились микро и суперкомпьютеры и САПЧ (САП и черчения) стали доступны университетам и малым фирмам. Когда стол для черчения заменяется дисплеем, то скорость работы опытного чертежника повышается в 3 раза. В это время поставщики САПЧ применяли не только автоматизированное проектирование, но и 3D моделирование.

Девяностые годы – период зрелости, когда были созданы основные линейки программных продуктов, существующие до настоящего времени. Бурный рост функциональности САПР с одновременным усложнением ряда ключевых функций и операций, связанных с распознаванием, обработкой и визуализацией трехмерных объектов привел к интенсивному развитию интерфейсных функций. Актуальными стали вопросы, связанные с интеграцией разнообразных возможностей, позволяющей вести речь об

автоматизации не отдельных элементов, а всего процесса проектирования, конструирования и производства.

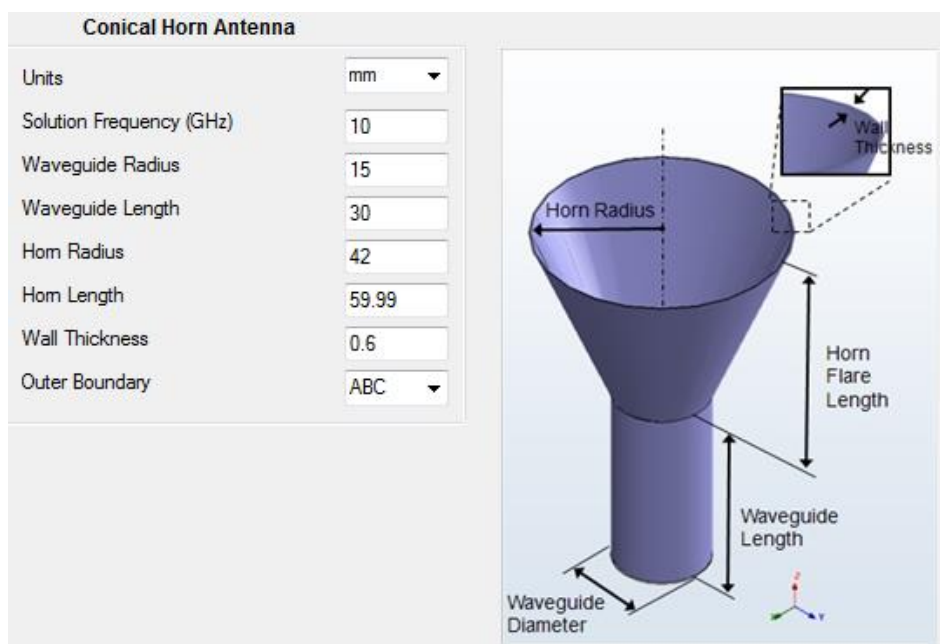


Рис. 4. Постановка задачи анализа и синтеза рупорной антенны

Нулевые годы ознаменовались появлением мощных персональных компьютеров, и разработкой большого числа программных продуктов. Доля интеллектуальных усилий и инвестиций на их разработку достигла, как отмечали эксперты, 30% в области информатики, программирования, электроники и др. смежных областях. Широкое распространение Интернета осуществило почти мгновенную передачу достижений разработчиков программ и алгоритмов пользователям, инженерам, исследователям, ученым из всех областей науки и техники.

Второе десятилетие XXI века отличается тем, что большие комплексы программ развиваются ускоренными темпами, и превращаются в программных монстров, таких как системы математических вычислений **MathCAD**, **MathLab**. Превращаются в сложные комплексы и специализированные программы электродинамического моделирования и проектирования СВЧ устройств и антенн **HFSS ANSYS**, и **CST STUDIO**

SUITE, FEKO, и COMSOL Multiphysics. Каждый год появляются новые версии программы. В интерфейсе каждой программы увеличивается количество утилит, методов, реализованных в программах, и разветвляются опции установок. Увеличивается стоимость, как самих пакетов, так и их изучения.

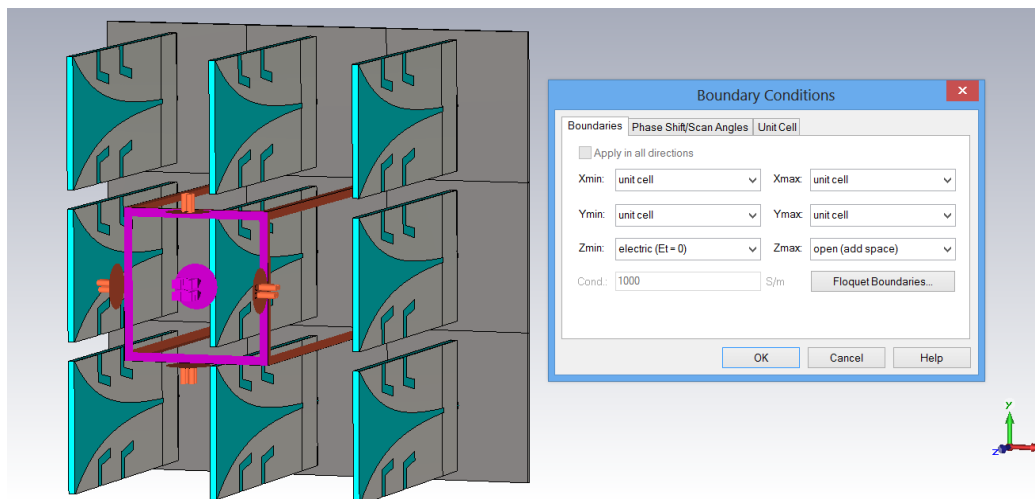


Рис. 5. Периодические граничные условия в интерфейса программы CST

Системы автоматизированного проектирования позволили в значительной степени освободить конструктора-проектировщика от однообразной, трудоемкой и утомительной работы и повысить его возможности на этапах принятия решений.

Первоначально САПР ориентировались на развитие компьютерной графики, создание чертежей и проектов. Поэтому значительное внимание с 70-х годов уделяется вопросам стандартизации графических программ. Стандарт на базисную графическую систему включает в себя функциональное описание и спецификации графических функций для различных языков программирования. В 1977 г. ACM (**A**ssociation for **C**omputing **M**achinery) публикует документ **Core**, описывающий требования к аппаратно-независимым программным средствам. В начале 1982 г. появляется система Graphical Kernel System (**GKS**), задающая примитивы, сегменты и преобразования графических данных и ставшая стандартом ISO в

1985 г. В 1987 г. разработан вариант **GKS-3D** с ориентацией на 3D графику. В 1986 г. утверждается ряд новых стандартов в области компьютерной графики. Среди них **CGI** (Computer Graphics Interface) и **PHIGS** (Programmer's Hierarchical Interactive Graphics System) - стандарт ANSI, ставший стандартом ISO в 1989 г. В 1993 году компанией Silicon Graphics предложен стандарт OpenGL (SGI Graphical Language), широко используемый в настоящее время. В этих системах используются графические форматы для обмена данными, представляющие собой описание изображения в функциях виртуального графического устройства (в терминах примитивов и атрибутов). Графический формат (метафайл) обеспечивает возможность запоминать графическую информацию единым образом, передавать ее между различными системами и интерпретировать для вывода на различные устройства. Такими форматами стали CGM - Computer Graphics Metafile, PostScript - Adobe Systems' Language, GEM - GEM Draw File Format и др. Работы по стандартизации были направлены на расширение функциональности графических языков и систем, включение в них средств описания не только данных чертежей и 3D-моделей, но и других свойств и характеристик изделий. В области автоматизации проектирования унификация основных операций геометрического моделирования привела к созданию инвариантных геометрических ядер, предназначенных для применения в разных САПР. Наибольшее распространение получили два геометрических ядра Parasolid (продукт фирмы Unigraphics Solutions) и ACIS (компания Spatial Technology). Ядро Parasolid разработано в 1988 г. и в следующем году становится ядром системы CAD/CAM Unigraphics, а с 1996 г. – промышленным стандартом.

В 1993 г. в США создается компания Solidworks Corporation и уже через два года она представила свой первый графический пакет Solidworks на базе геометрического ядра Parasolid. Система Solidworks вошла в число ведущих систем среднего уровня.

История Autodesk началась в 1982 году, когда группа из 13 программистов (ведущий программист Майк Риддл) сосредоточила свои усилия над несколькими программными продуктами, в числе которых была программа MicroCAD. Наибольшую популярность приобрел созданный ими графический пакет AutoCAD, работающий в среде Windows.

В современных программах электродинамического моделирования имеется собственная программа черчения трехмерных СВЧ структур, но также имеется возможность импорта и экспорта 3D объектов в перечисленных выше форматах.

3. Развитие зарубежных САПР СВЧ

В США первыми программами анализа нелинейных электронных схем были TAP, NET-1, разработанные в 1962 и 1964 гг. соответственно, а также более известная программа ECAP. У истоков автоматизации проектирования в электронике стояли **Ф.Брэнин, Д.Калахан, Р.Рорер** и др. В 80-е годы проблемами автоматизации проектирования СБИС на логическом и схемотехническом уровнях активно занимаются **А. Ньютон, А. Санджованни-Винченелли, С. Дайректор** и др.

Разработка САПР СВЧ устройств в виде отдельных утилит, а далее и коммерческих программ, началась в шестидесятые годы, и степень ее интенсивности возрастала по мере развития теории СВЧ устройств и совершенствования вычислительной техники [26].

В 1973 **Les Besser** представил первое коммерчески доступное программное обеспечение, поддерживающее автоматизированное проектирование СВЧ устройств, названное **COMPACT** (computer optimization microwave passive and active schematic) [27, 28]. Эта программа была позже преобразована в **SuperCOMPACT** и на несколько лет стала индустриальным

стандартом. Несколько позже появилась популярная программа расчета СВЧ устройств **TOUCHSTONE** фирмы EESoft.

Коммерческие программы СВЧ **SuperCOMPACT** и **TOUCHSTONE** имеют большие библиотеки СВЧ элементов, включая полосковые, микрополосковые и волноводные неоднородности, свободный формат ввода данных (выбор имен, комментариев, положений численных данных на перфокарте), поэтому эти программы стали эталонными на протяжении 5-10 лет. Они осуществляли линейный анализ СВЧ схем при помощи матричного аппарата расчета (рис. 6).

DIM !Блок размерностей									
FREQ	GHZ	!Частота в ГГц							
RES	OH	!Сопр. в омах							
IND	NH	!Индуктивность в нГ							
CAP	PF	!Емкости в пФ							
LNG	mm	!Длина в миллиметрах							
TIME	NS	!Время в наносекундах							
COND	/OH	!Проводимость в сименсах							
ANG	DEG	!Углы в градусах							
CKT !Блок описания схемы									
SSUB	ER=2 B=4 T=0.1 RHO=1 !Подложка полосковой линии								
TAND	TAND=1.9e-03 !Тангенс диэлектрических потерь								
SCLIN	1	2	3	4	W=2	S=0.5	L=50		
DEF4P	1	2	3	4	HALF	!Название схемы			
FREQ	!Задание частот								
SWEEP	5.0	10.0	5.0	!Анализ в частотном диапазоне 5 ... 10 ГГц					
OUT	! вывод S-параметра (затем ANG[S11] и т.д.)								
HALF	MAG[S11]								

Рис. 6. Интерфейс программы Touchstone с описанием задачи анализа связанных линий в диапазоне частот

Одновременно интенсивно развивался метод гармонического баланса для анализа нелинейных СВЧ устройств, реализованный в программе **LIBRA**. Общий процесс развития САПР можно представить в виде спиралеобразного процесса, в котором явно наблюдается область сужения аналитических расчетов и увеличения области численных расчетов (рис. 7).

Libra позволяет рассчитывать нелинейные схемы СВЧ, с несущественной нелинейностью (расчет интермодуляционных искажений) и существенной нелинейностью (нелинейные искажения).

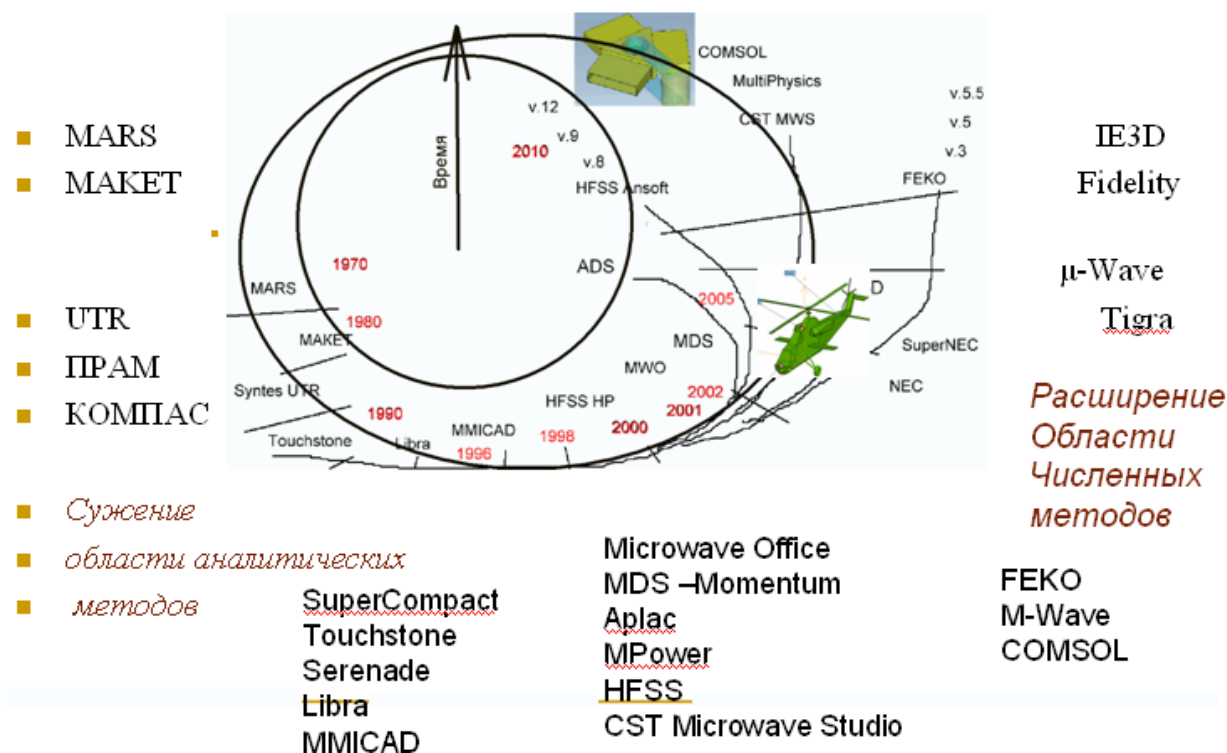


Рис. 7. Рождение, трансформация и место программного обеспечения по времени

Управление работой перечисленных программ осуществлялось при помощи общего графического интерфейса **Academy**, который обеспечивает ввод данных и управление программами моделирования, документирование проектов, а также топологическое проектирование печатных плат. Интерфейс **Academy** использован в программах **Touchstone**, **Libra**, **Omni Sys** и **Microwave Spice** фирмы EESof.

Следующим этапом развития СВЧ САПР служит разработанная фирмой Hewlett Packard система **MDS (Microwave Design System)** [29]. Она представляет собой интегрированную систему схемотехнического моделирования и создания топологии СВЧ устройств (рис. 8).

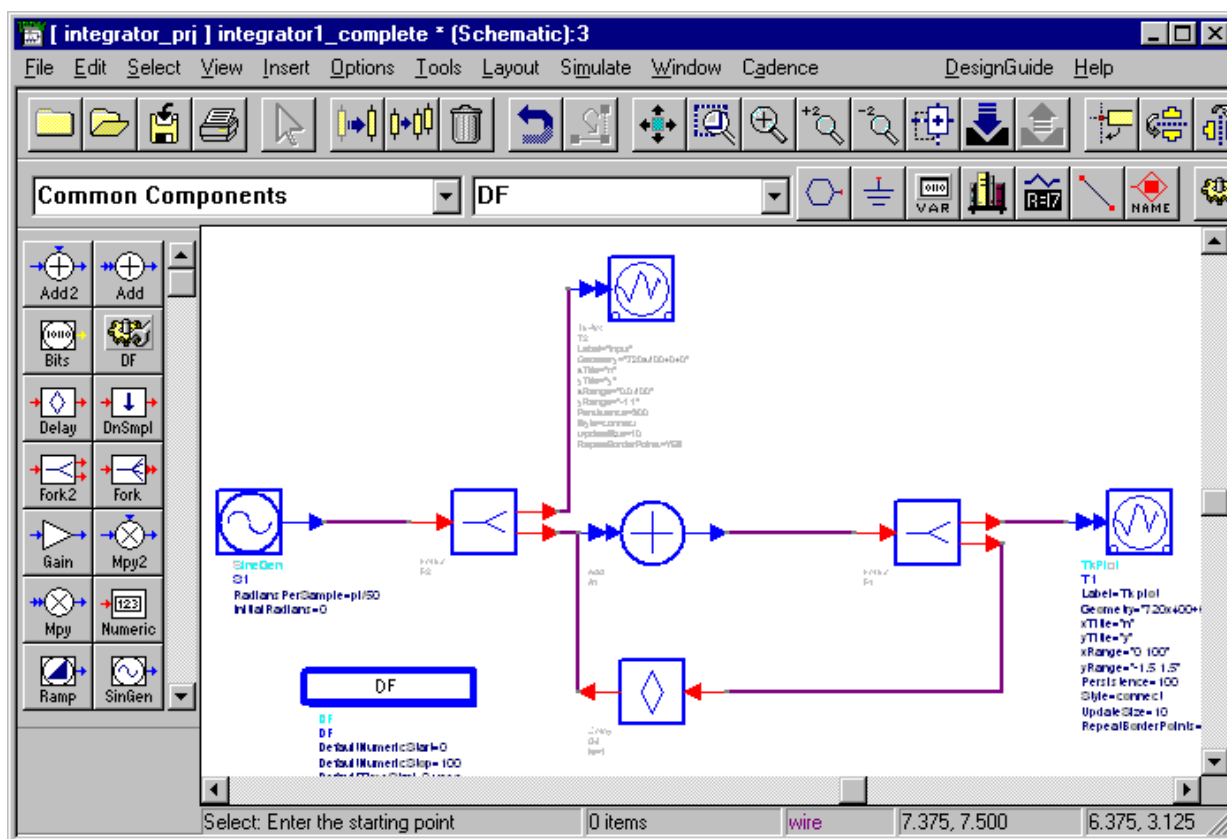


Рис. 8. Схема интегратора с генератором на входе и интерактивным выводом в интерфейсе программы ADS

В частности, ее можно использовать при разработке монолитных СВЧ интегральных схем, а также СВЧ гибридных и радиочастотных схем.

Система **MDS** включает в себя блок ввода исходных данных, блоки моделирования линейных и нелинейных схем, а также блок создания топологических чертежей. Ввод схемы прост. Он аналогичен изображению схемы на листе обычной бумаги. Обеспечена возможность последовательного усложнения исходной схемы. Система **MDS** часто поставлялась в комплекте с ЭВМ и использовалась на рабочих станциях Hewlett Packard.

В основу дальнейшего развития САПР СВЧ были положены идеи интеграции различных систем, например, **Touchstone**, **Libra**, с одной стороны, и системы **MDS**, с другой. На этой основе фирмами Hewlett Packard

и EEsof совместно была создана новая многофункциональная система **Series IV** версии 5.0 [30], которая обеспечивает возможность осуществления полного цикла автоматизированного проектирования СВЧ линейных и нелинейных узлов, а также проектирование современных систем связи, телевизионных систем, радиолокаторов, космических систем, цифровых устройств и т.д. В системе **Series IV** используются входной графический интерфейс PDE (Project Design Environment) и язык AEL (Application Extension Language).

Линейные СВЧ-системы анализируются методом, используемым в системах Spice (уравнения Кирхгофа), нелинейные - методом гармонического баланса [31]. При анализе волноводных узлов, в том числе трехмерных [32-34], используется метод конечных элементов, при анализе планарных устройств - метод моментов.

Для решения более узких задач предлагаются системы:

Touchstone (моделирование линейных СВЧ-устройств);

Libra (моделирование нелинейных СВЧ- устройств),

J-Omega (моделирование линейных и нелинейных радиочастотных цепей);

Omni Sys (моделирование систем).

В системе **Series IV** используется операционная система UNIX [35]. Для реализации системы **Series IV** требуется использование одного из вариантов рабочих станций HP 9000 серии 700 или станций Sun SPARC, а также компьютеров типа IBM RS 6000. В более позднюю версию 6.0 системы IV [35] внесены существенные положительные дополнения и изменения. В частности, в нее полностью интегрирована быстродействующая подсистема HP E4665A электродинамического моделирования планарных СВЧ устройств, включая многослойные схемы, содержащие копланарные волноводы, микрополосковые антенны и т.д., а также элементы с

произвольной геометрией. Имеется возможность визуализации распределения токов и электрических полей. Разработана новая методика моделирования антенн и процесса распространения волн (HP E4637A), а также осуществления выборок (Multi-Rate Discrete-Time Sampling). Предусмотрено взаимодействие системы Series IV с векторным анализатором сигналов HP 89440. Система **Series IV** содержит данные приблизительно для 42 тысяч элементов. В систему **Series IV** включена новая модель полевого транзистора Шотки (автор Root), а также программа **E-Syn**, предназначенная для анализа согласующих цепей и фильтров. Значительно упрощено взаимодействие пользователя с ПК, в частности, при компоновке элементов. Улучшена связь с программой **Mentor Graphics EDA** и организовано взаимодействие с системой **Cadence Design**.

Следующим этапом в развитии систем машинного проектирования, осуществленным фирмой Hewlett Packard-EEsof, была разработка многофункциональной системы **Advance Design System (ADS)** [36-39]. В ее состав (рис. 9) входят подсистемы проектирования:

- систем связи;
- цифровых схемы DSP - Design;
- радиочастотных интегральные схемы;
- СВЧ - схем (устройства) - Microwave Circuit Design (MCD);
- топологий ВЧ плат - RF Board Design (RFBD).

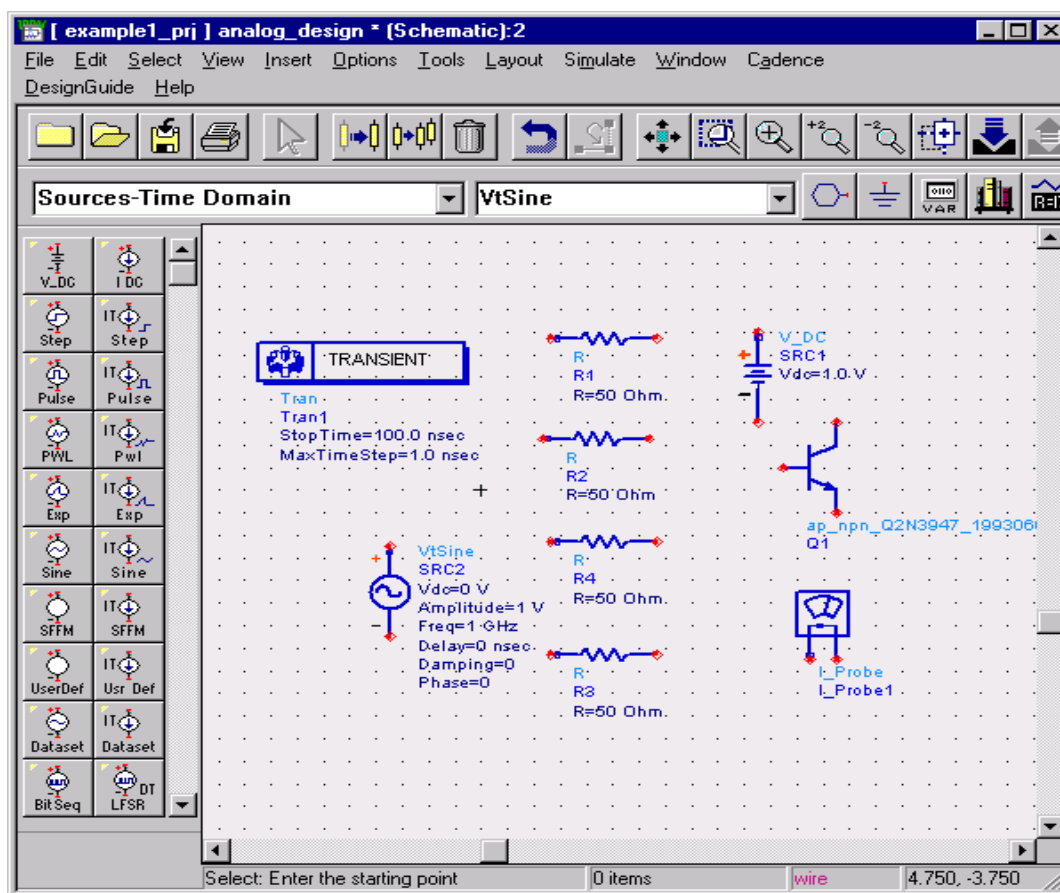


Рис. 9. Элементы аналогового усилителя и контроллера моделирования *TRANSIENT* в интерфейсе ADS

Подсистема **RFIC** предназначена для проектирования маломощных и мощных усилителей, смесителей, генераторов, цепей обратной связи, устройств контроля уровней сигналов и т.д. Она основана на пяти различных методах моделирования в частотной, временной и смешанной областях (гармонический анализ, методы, использованные в высокочастотных версиях **Spice**, в программе **Circuit Envelope** и т.д.). Предусмотрены оптимизация, работа со списком соединений (Netlist), выход на системы изготовления печатных плат.

Разработаны два варианта подсистемы **RFIC: Pro** и **Premier**. Последний вариант позволяет осуществлять статистический анализ и включает в себя программу создания аналоговых моделей. СВЧ - подсистема **MCD** обеспечивает точный анализ и моделирование распределенных

элементов и неоднородностей. Она содержит библиотеки моделей СВЧ-транзисторов и диодов, осуществляет схемное представление и расчет характеристик передающих линий: микрополосковой, полосковой, с подвешенным полоском и копланарной. Предусмотрен статистический расчет допусков.

В состав системы **ADS** входят около 50 модулей (модули моделирования схем, элементов и систем, трансляторов, библиотек и т.д.). Связь между ними осуществляется через графический интерфейс (оболочку). Работа системы **ADS** иллюстрируется большим числом примеров. Для одного из них на рис.

10 дан общий вид среды проектирования цифрового приемника.

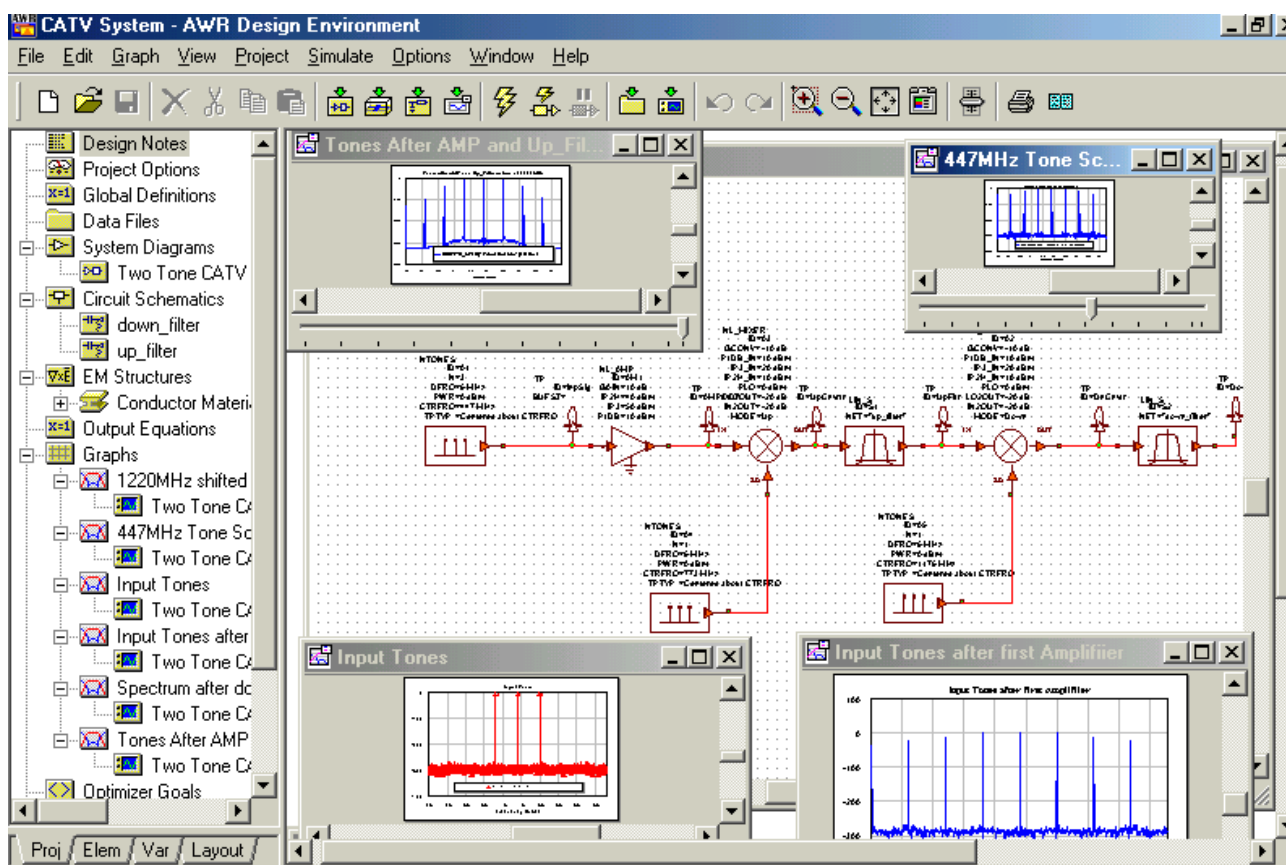


Рис. 10. Схема VSS анализа линии связи абонентского телевидения

На рис. 10 показана схема, устанавливающая взаимосвязь между модулями системы **ADS**. Система **ADS** [20] позволяет выполнить косимуляцию радиотракта, под которой понимается анализ структуры, в

которую входят как аналоговые, так и цифровые блоки. Установление взаимосвязи в таких трактах потребовало введения таких понятий, как цифровой поток, и включение в тракт преобразователей - адаптаторов, например таких, как блоков АЦП и ЦАП. Расчет цифровых устройств выполняется во временной области.

Высокочастотный модуль HSpice предназначен для анализа во временной области больших интегральных схем (включающих до нескольких тысяч транзисторов), а также переходных процессов. Возможен расчет статистических и импульсных характеристик смесителей, генераторов, усилителей и т.д.

Моделирующий модуль гармонического баланса разработан для проектирования нелинейных ВЧ и СВЧ систем. В его основу положен алгоритм Крылова, обеспечивающий высокое быстродействие и уменьшенный объем памяти.

В состав системы **ADS** входят библиотеки элементов фирм изготовителей (Vender Parts Libraries): библиотеки СВЧ и ВЧ транзисторов, библиотеки высокочастотных и аналоговых элементов, библиотеки пассивных радиочастотных элементов и емкостей большинства мировых фирм с топологиями (рис. 11).

К модулям, обеспечивающим физическую реализацию элементов и полной конструкции, относится прежде всего модуль **Layout** (рис. 11), основным назначением которого является генерирование топологии слоев из схемного редактора и наоборот. С ним тесно связан модуль **Momentum**. Он осуществляет электродинамический анализ многослойных планарных структур, представляет результаты в виде S параметров.

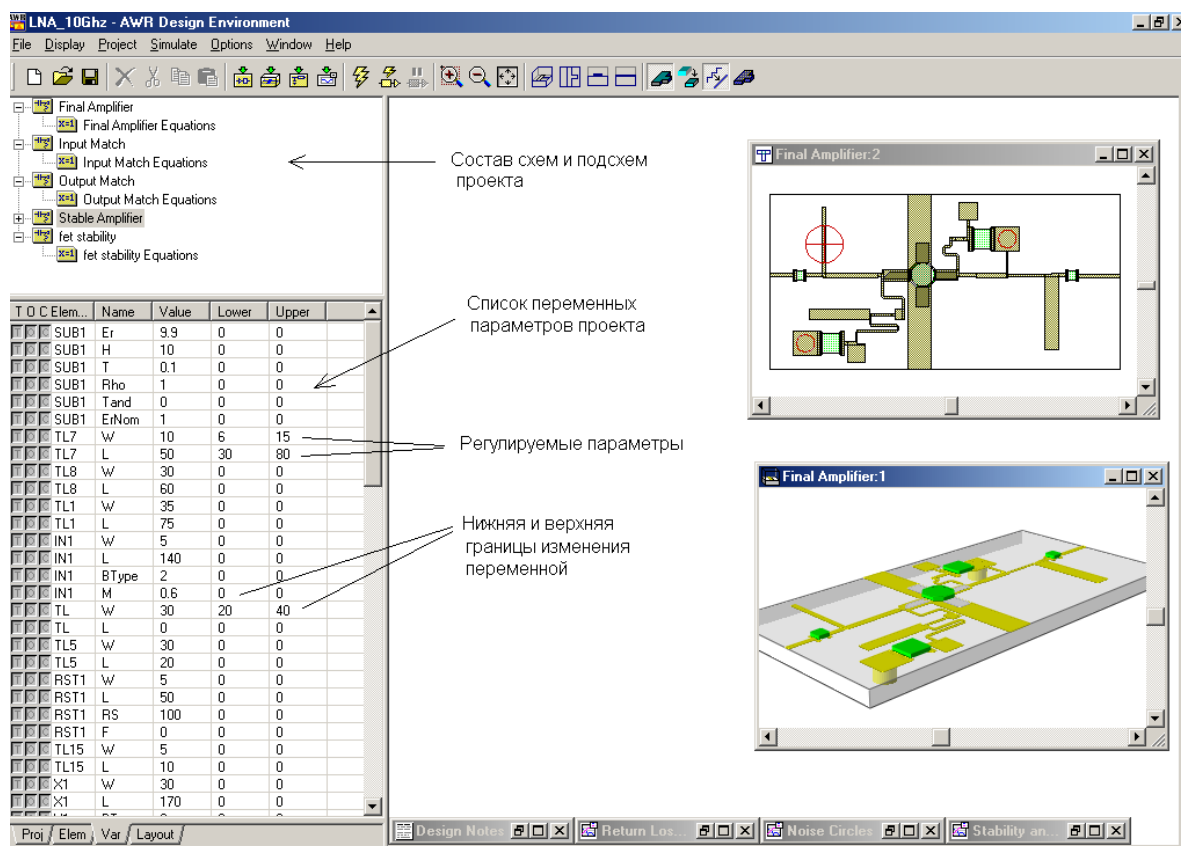


Рис. 11. Интерфейс программы MWO AWR

В основу его положен метод моментов. Модуль **Graphical Cell Compiler** осуществляет связь топологического и схемного редактора. Модуль **Design Rule Checker** осуществляет тестирование создаваемой топологии на предмет обнаружения ошибок. Модуль **Ptolemy** представляет собой модуль моделирования на системном уровне, основанный на принципе использования потоков данных. Он позволяет осуществлять расчет и моделирование DSP и RF-устройств, таких как приемники и передатчики, модемы, сотовые телефоны, радары и т.д., а также анализ интермодуляционных искажений, фазовых шумов, влияния КСВН и т.д.; и имеет интерфейс, аналогичный интерфейсу **ADS**, большое количество моделей и шаблонов.

Наряду с универсальными системами автоматизированного проектирования СВЧ устройств, которые позволяют осуществить моделирование на уровне решения граничных задач электродинамики, таких

как **ADS** разрабатывается большое количество специализированных систем, основанных на приближенных методах анализа: теории СВЧ линий передачи (телеграфные уравнения), методе Олинера, диаграмме Вольперта – Смита.

Например, Фирмой Hewlett Packard также разработана небольшая, но практически удобная система **AppCAD** (рис. 12), с помощью которой можно, в частности, рассчитывать:

- усилительные каскады на СВЧ- транзисторах;
- смесители, включая определение спектра гармоник
- ошибки рассогласования в схемах с направленным ответвителем;
- параметры передающих линий (микрополосковых, полосковых, копланарных, коаксиальных);

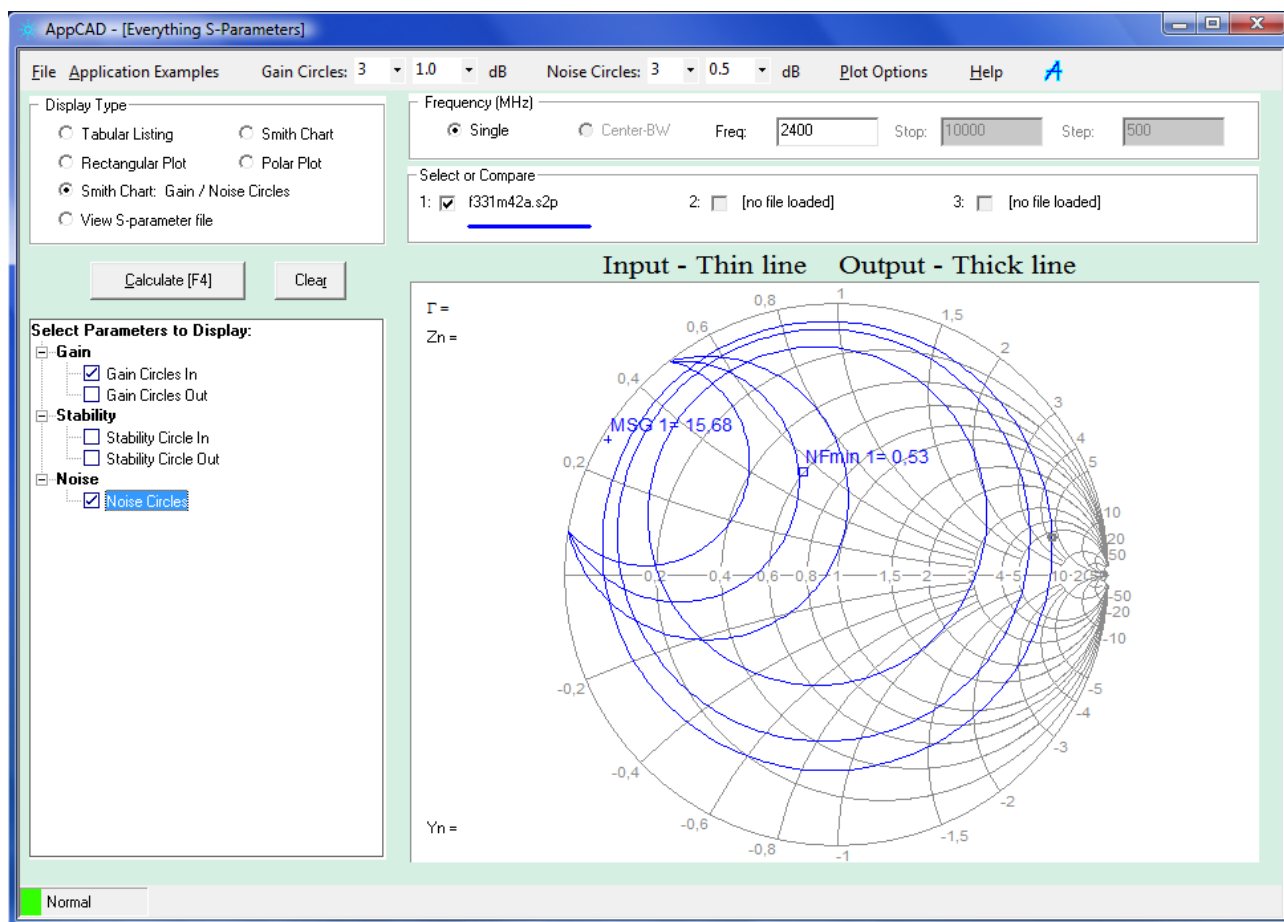


Рис. 12. Интерфейс программы AppCAD, с электронной диаграммой Смита

- характеристики разного рода двухполюсников, состоящих из параллельно и последовательно включенных элементов R , L , C ;
- спиральные индуктивности;
- параметры L -, T - и Π -образных цепей согласования;
- некоторые типы p - i - n -аттенюаторов и переключателей;
- детектор на ДБШ;
- цепи смещения транзистора;
- шумовые характеристики цепи, состоящей из четырехполюсников;
- тепловые характеристики некоторых объектов.

Диаграмма Смита, предложенная Филиппом Смитом в 1940 году - это мощное вспомогательное средство расчета СВЧ цепей. Кроме чисто практического значения, она дает понимание принципа согласования комплексных сопротивлений и многое другое. Диаграмма Смита применяется в **Touchstone**, **Microwave Office** и всех других программах проектирования СВЧ устройств.

С широким внедрением в практику проектирования персональных компьютеров, получили распространение электронные диаграммы Смита, например разработанная в Университете Бёрн профессором Дельшпергером (e-mail fritz.dellsperger@hta-be.bfh.ch) и распространяемая в виде демоверсии.

Программа **Smith Chart** состоит из меню, изображения диаграммы Смита, окон схем, точек данных, инструментов согласования и др. (рис. 13).

В работе "Powerful Design and Analysis Software" (Реклама фирмы Engineers Club. Microwave J. 1994. Vol.37, № 7. P.67) рекламируются 39 эффективных программ и систем анализа и проектирования (**Mini Math CAD**, **App CAD** и др.)

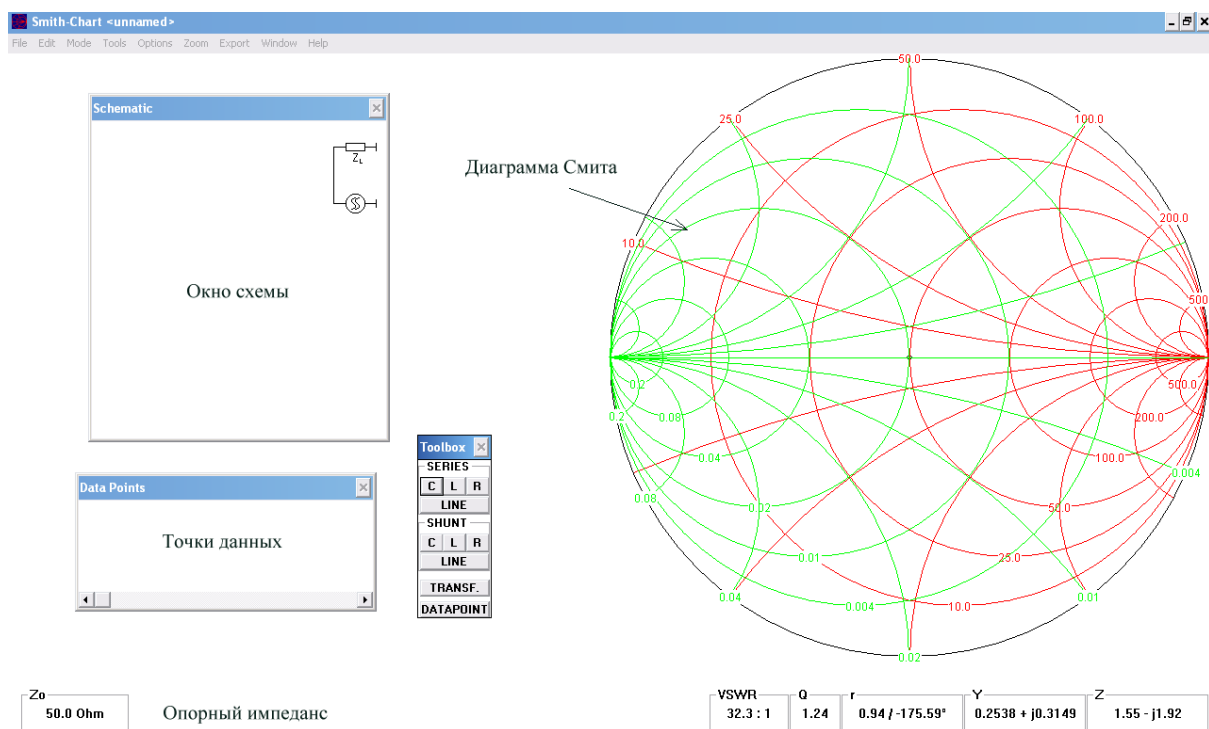


Рис. 13. Интерфейс электронной диаграммы Смита

Одной из фирм лидеров, в течение значительного времени занимавшихся разработкой САПР СВЧ, являлась фирма Compact Software Inc. Разработанная этой фирмой и получившая широкое распространение система **Super-Compact** [41] обеспечивает возможность общего анализа и оптимизации линейных устройств СВЧ и радиочастот. Осуществляется анализ и оптимизация четырехполюсников, а также моделирование импедансов транзисторов и синтез согласующих цепей.

Имеется библиотека характеристик выпускаемых на тот момент промышленностью транзисторов. Предусмотрена возможность установки в модель одиночных и связанных линий передачи. Для получения временных характеристик применяется быстрое преобразование Фурье (БПФ). Оптимизация осуществляется градиентным и вероятностным методами. Для расчета параметрической чувствительности используется алгоритм Монте-Карло.

Система **Super-Compact** в дальнейшем была включена в систему **Microwave Harmonica** [42], обеспечивающую расчет нелинейных СВЧ устройств. Фирмой **Compact Software** был также разработан СВЧ вариант системы SPICE [43], вошедший в качестве важного блока в последующие разработки этой фирмы. Система **Microwave Harmonica** широко применяется при решении различных задач анализа и проектирования (см. например, работу [44]).

Наиболее известным современным программным продуктом фирмы Compact Software (в 1990-х годах подразделение фирмы Ansoft) является комплекс программ **Serenade** [43,44]. Он обеспечивает сквозное проектирование систем, устройств и приборов радио, СВЧ и оптического диапазонов волн. Обеспечивается также возможность анализа оптимизации и расчета топологии с учетом производственного разброса и погрешностей измерения параметров ЭРЭ. В комплекс **Serenade** (рис. 2.5) входят программы **Super Compact**, **Microwave Harmonica**, а также программа **Scout** для создания библиотек математических моделей.

Значительный интерес представляет программа **MMICAD** (Monolithic and Microwave Integrated Circuit Analysis and Design) канадской фирмы Optotec [45]. Это программа имеет собственный графический редактор, позволяет переводить схемное представление в топологическое и наоборот и оптимизировать топологические схемы по заданным требованиям на электрические характеристики. Она позволяет также осуществлять синтез большого числа типов ВЧ и СВЧ фильтров, являясь совершенным инструментом проектирования широкого класса линейных СВЧ устройств. Отсутствие нелинейного анализа и анализа во временной области компенсируется возможностью экспорта схемных файлов в форматах **PSpice**, **Harmonica** и **Libra**.

MMICAD версии 2 интегрируется с редакторами схем **AS3** или **OrCAD Schematic Capture**. Имеются дополнительные программы, обеспечивающие синтез согласующих цепей с использованием круговой диаграммы, расчет коаксиальных элементов и резонаторов. Имеется возможность считывания экспериментальных данных, включая S-параметры, а также тестирования измерительных устройств, изменения смещения и автоматического увеличения входного сигнала. Предусмотрена возможность автоматизированной обработки и создания библиотек S параметров.

Большинство из используемых в настоящее время линеек зарубежных систем моделирования СВЧ устройств начали разрабатываться в 70 и 80-х годах. Они первоначально обычно предназначались для работ в ОС UNIX и лишь, затем были адаптированы для Windows.

В 1998 году компания Applied Wave Research (**AWR**) представила интегрированный пакет (систему) **Microwave Office (MWO)**. Пакет MWO написан непосредственно на объектно-ориентированном языке C++, что обеспечивает возможность быстрого перехода к новым методам моделирования и существенно повышает быстродействие. Пакет MWO оптимизирован для работы под управлением 32 разрядных ОС, таких как Windows 95,98 и Windows NT.

Система Microwave Office v.2x (т.е. v. 2.2,2.5 и др.) включала в себя два модуля: Voltaire XI - пакет моделирования линейных и нелинейных схем и EMSight - пакет трехмерного, электромагнитного моделирования (рис. 14).

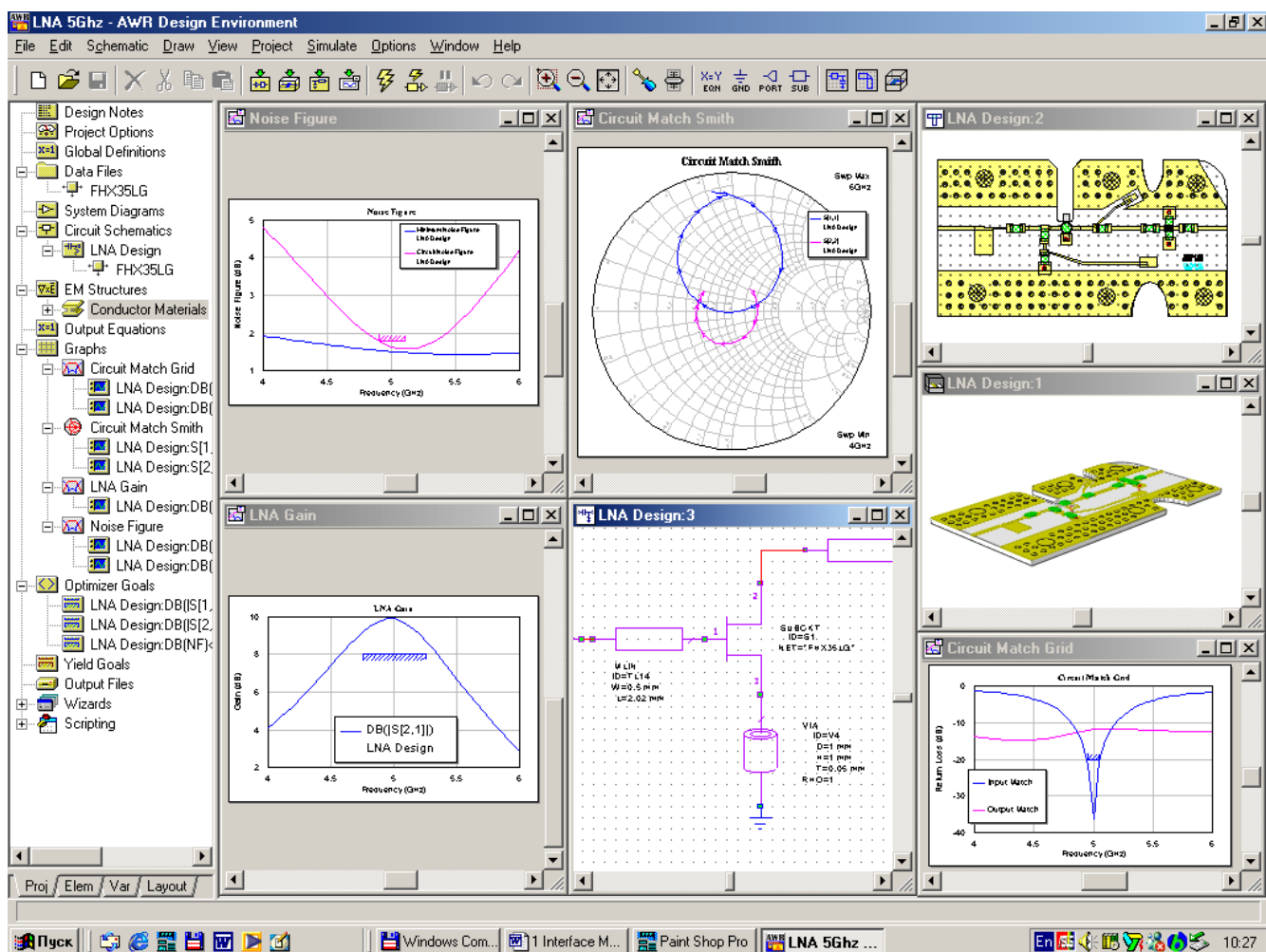


Рис. 14. Общий вид окна среды проектирования AWR

В основу пакета **Voltaire XI** положены:

- одночастотный и многочастотный методы гармонического баланса (для анализа нелинейных схем);
- статические и зависящие от времени ряды Вольтерра (для расчета интермодуляционных искажений);
- высокоскоростной метод линейного анализа;
- интегрированная система файлов в форматах Spice и MMICAD.

В то время как ранее реализация метода гармонического баланса осуществлялась обычно на базе схемотехнического анализа низкочастотных

аналоговых схем, пакет **Voltaire XL** был разработан специально для высокочастотных и СВЧ приложений. Это значительно повысило быстродействие и, как следствие, обеспечило возможность настройки относительно сложных схем в реальном масштабе времени с использованием специального тюнера.

Применение рядов Вольтерра (РВ) для расчета интермодуляционных искажений (ИМ) в квазилинейных схемах позволило увеличить скорость анализа на 1-2 порядка по сравнению с методом гармонического баланса. Анализ на основе РВ легко интегрируется с методами линейного анализа, что позволяет оптимизировать коэффициент шума, а также коэффициент передачи и входной КСВН одновременно с уровнем ИМ. Использование изменяющихся во времени рядов Вольтерра позволило решить задачу анализа ИМ в смесителях.

Высокая скорость линейного, нелинейного и шумового видов анализа в пакете **Voltaire XL** является следствием объектно-ориентированного подхода, а также того, что система уравнений формируется из непосредственного представления схемы без дополнительного преобразования списка соединений схемы в файл.

Пакет EMSight предназначен для электродинамического моделирования СВЧ устройств и элементов: высокочастотных интегральных и монолитных схем, микрополосковых антенн, а также высокоскоростных цифровых печатных плат.

В основу работы пакета положен метод Галеркина. Структуры анализируются внутри ограниченной многослойной области. Число слоев, межслойных соединений и внешних выводов формально не ограничено. Для анализа структур в частотном диапазоне применен алгоритм быстрого

преобразования Фурье (FFS), обеспечивающий вычисление передаточной функции схемы и ее производных по частоте (до 12-й производной).

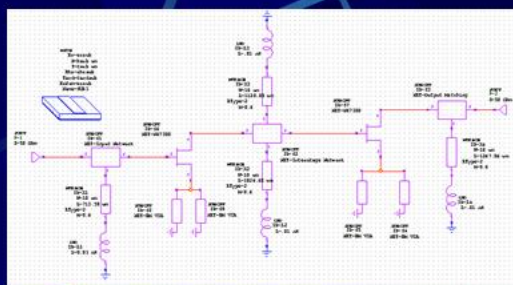
Мощные графические возможности системы **EMSight** позволяют пользователю наблюдать цветное трехмерное изображение токов высокой частоты с отображением не только их амплитуд, но и направлений. Результаты расчетов могут быть представлены на круговой диаграмме в виде графиков в прямоугольной и полярной системах координат или в виде таблиц.

Предусмотрены встроенные интерфейсы ввода и вывода, обеспечивающие переход к другим форматам (в частности, Touchstone) и, следовательно, совместную работу с другими популярными системами линейного и нелинейного анализа производства компаний Ansoft (Compact Software), HP EEsof, Optotek, Sonnet EM и др.

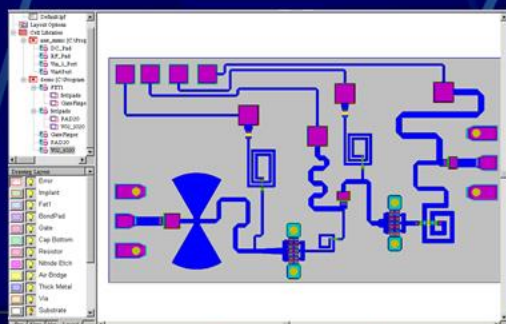
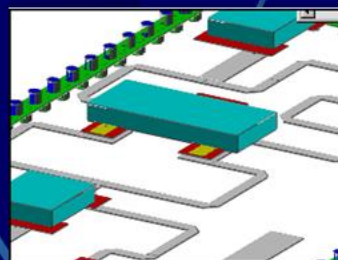
В состав пакета **MWO** входят файлы с многочисленными примерами расчета СВЧ узлов: основных типов транзисторных усилителей и генераторов, выполненных на планарных линиях передачи фильтров, индуктивностей, планарных антенн и т.д.

Пакет MWO работает на ПК с тактовой частотой выше 100 МГц и ОЗУ в 32 Мбайт, однако, для решения сложных электродинамических задач требуются ПК с более высокой системной конфигурацией.

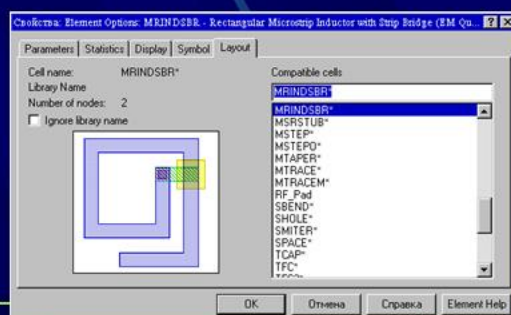
Модуль топологического анализа Layout



Электрическая схема



Топология усилителя



Изобразительный образ индуктивности

Рис. 15. Топология СВЧ усилителя на транзисторе в MWO

Существенным отличием системы **Microwave Office 2000** (версии 3.09, 3.22) от предыдущих версий является то, что в нее был включен редактор топологий Artisan (рис. 15), представляющий собой графическую среду для проектирования СВЧ устройств на различных подложках с выходом на технологическое оборудование. В этих версиях возможен экспорт СВЧ топологий не только из модуля **EMSight**, но также из схем, составленных на основе использования библиотечных элементов.

Каждой библиотечной модели элемента поставлен в соответствие ее топологический эквивалент. Имеются возможности для создания новых и заимствования и изменения уже имеющихся моделей элементов.

Топология устройства (элемента) создается одновременно с созданием его схемы в модуле Voltaire XL. Возможно изменение топологии (например, изменение размеров МПЛ, перемещение элементов и т.д.), при этом автоматически осуществляется пересчет характеристик элемента. В редакторе имеется возможность создания многослойных плат, учета различных технологических процессов, а также просмотра трехмерного представления проектируемого устройства.

Редактор позволяет осуществить ввод и вывод характеризующих данную топологию параметров в формате GDII, чем обеспечивается выход на конечное производственное оборудование.

По сравнению с предыдущей версией пакет MWO 2000 обладает новыми возможностями, такими как осуществление нелинейного анализа генераторов, нелинейного шумового анализа (включая анализ фазовых шумов и шумов смесителей), а также нелинейного анализа устойчивости.

В систему **Microwave Office v. 4** (Microwave Office 2001) был внесен ряд изменений и дополнений с целью дальнейшего повышения ее эффективности. В частности, в области моделирования был использован усовершенствованный метод гармонического баланса (ГБ), обеспечивший повышение скорости нелинейного анализа (в зависимости от сложности схемы). Метод ГБ был распространен на случай наличия трех входных сигналов, что позволило осуществить анализ интермодуляционных искажений в смесителях. Существенным шагом вперед было установление непосредственной связи результатов электродинамического моделирования с представленными в системе Spice схемами. В области линейного моделирования были значительно расширены возможности моделирования элементов и неоднородностей на копланарных волноводах, а также МПЛ

узлов с боковой связью, включающих до 16 линий и до четырех слов (рис. 16).

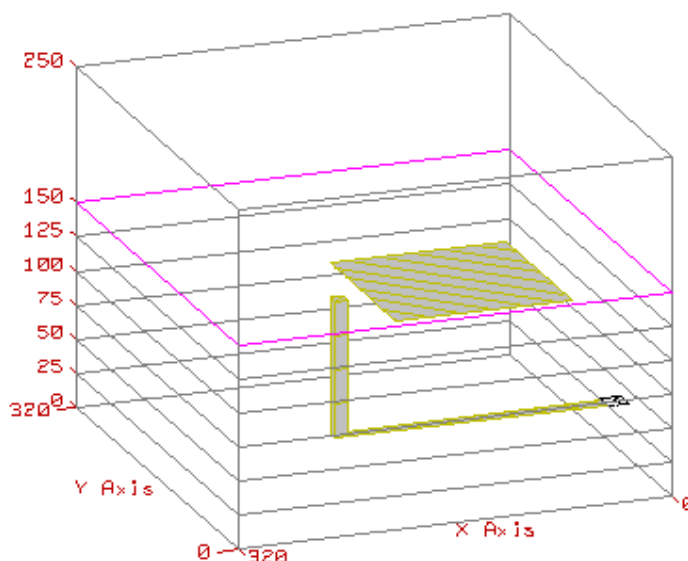


Рис. 16. Резонатор, состоящий из многих слоев, возбуждаемый вертикальной перемычкой

Microwave Office 2002 обеспечивает возможность одновременного моделирования схем СВЧ и цифровой обработки сигналов (ЦОС, DSP). Новый алгоритм моделирования, позволяющий осуществлять полный анализ сложных систем связи, существенно расширил возможности системы. Значительно расширена библиотека моделей СВЧ компонентов, используемых при анализе частотных характеристик методами гармонического баланса и рядов Вольтерра.

В систему **Microwave Office** включены блоки синтеза фильтров (Filter Synthesis Wizard) и согласования нагрузок (Load Pul Wizard). Добавлен раздел анализа фазовых шумов генераторов. Автоматизированы средства синтеза цепей согласования.

Компания AWR (Applied Wave Research) – создатель линейки **Microwave Office** в настоящее время специализируется на разработке САПР

телекоммуникационного оборудования (сотовые телефоны, пейджеры, локальные системы спутникового цифрового вещания (DBS) и т.п.). Штаб-квартира AWR, одного из мировых лидеров в области разработки ВЧ/СВЧ САПР, находится в Калифорнии, сама компания полностью принадлежит компании National Instruments. Программа **MWO** вплоть до MWO-2002 считалась эталонной и широко распространена в системе университетского обучения.

Система **Sonnet V. 6** [46] предназначена для моделирования планарных линейных СВЧ узлов (в частности, фильтров). Блок EM осуществляет электродинамический анализ. Для решения уравнений Максвелла в ней используется модифицированный метод моментов в трехмерном пространстве преимущественно применительно к планарным структурам. Рассчитываются S, Y или Z-матрицы, параметры передающих линий, а также Spice-эквивалентные схемы с сосредоточенными элементами. Кроме того, формируются файлы для работы блоков emvu и ratvu. С помощью блока **emgraph** результаты расчетов представляются в декартовых координатах или на круговой диаграмме.

В настоящее время отмечается бурный рост в области развития систем связи. Это стимулировало разработку соответствующих, прежде всего системных САПР. Они частично включают в себя или используются совместно с ранее разработанными САПР СВЧ Serenade [43], ADS [36] и др. Так, например, в системной САПР Symphony (www.ansoft.com) могут использоваться в качестве компонентов некоторые блоки, проектируемые с помощью **Serenade**, системные блоки входят непосредственно в **ADS**.

Системные САПР обычно имеют модульную (блочную) конструкцию, включающую в себя в качестве модуля модели усилителей, генераторов, цифровых фильтров и т.д. По этому принципу построены, в частности,

наиболее известные системы САПР Acolade ([www. icucom. com](http://www.icucom.com)), Xpedian Colden Gate RF/Microwave Design Tools ([www. xpedian. com](http://www.xpedian.com)) и другие [47-48].

Представляет интерес программа анализа и оптимизации линейных и нелинейных СВЧ цепей C/NL2, автором которой является один из ведущих специалистов фирмы AWR Maas S.A. [49].

Программа **HFSS** (High Frequency Structural Simulator) - это эталонная САПР СВЧ, которая появилась на рынке в середине 1990-х годов и без сомнения завоевала большой авторитет среди пользователей электродинамических программ трехмерного моделирования. HFSS первоначально был разработан профессором Zoltan Cendes и его студентами в университете Карнеги-Меллона. Профессор З. Цендес и его брат Николас Цендес основали компанию Ansoft и продали HFSS сначала фирме Hewlett Packard. Впоследствии HFSS HP стал ядром разработанной версии HFSS фирмы Ansoft.

4. Разработка САПР СВЧ в СССР и СНГ

Разработка САПР СВЧ устройств в России и в бывшем СССР, по существу, проводилась в тех же направлениях и на той же теоретической основе, что и на Западе. Тем не менее, при решении конкретных задач, а в ряде случаев и разработке принципиальных вопросов было найдено немало оригинальных решений. Первая публикация о программе анализа электронных схем в СССР появилась в 1965 г. Это была программа ПАЭС, разработанная годом раньше в МВТУ им. Н.Э.Баумана И.П. Норенковым для ЭВМ Урал-2.

В этой программе были использованы более ранние работы по моделированию полупроводниковых приборов, выполненные **Эберсом** и **Моллом** в США, **С.Е. Жорно** в СССР. В 70-е годы были созданы программы

аналогичного назначения в Зеленограде **В.П. Панферовым** (ПАЭС-1) и коллективом под руководством **Г.Г. Казеннова** и **Б.В. Баталова** (САМРИС), в МАИ — **В.Н. Ильиным**, в МИФИ — **А.Я. Архангельским**, в Киеве — **В.П. Сигорским** и **А.И. Петренко** и др.

Большой вклад в разработку САПР СВЧ внесли научные школы и коллективы **Никольского В.В.** [50], **Сестрорецкого Б.В.** [51,52], **Ланцова В.Н.** [53] и др.

Сотрудниками Киевского политехнического института (**Шелковниковым Б.Н.** и др.), а также сотрудниками связанных с ним промышленных предприятий (**Казанджаном Н.Н.**, **Сухоруковым И.В.**) много лет велись работы по созданию как низкочастотных, так и СВЧ (особенно нелинейных) САПР [54,55].

Многими другими ВУЗами и институтами разрабатывались свои, нередко узконаправленные: системы достаточно высокого уровня. Тем не менее в некоторых отношениях они уступали западным. Это прежде всего касается сервиса и наличия, адекватных моделей полупроводниковых элементов.

Пакет **МПП**, разработанный предприятием "Алмаз-42" (Москва) [56,57], предназначен для сквозного проектирования СВЧ устройств в микрополосковом исполнении от параметрического синтеза и моделирования, формирования топологии платы и размещения в ней элементов до получения контрольного рисунка и формирования управляющих магнитных носителей с целью изготовления фото оригиналов.

Библиотека базовых элементов содержит свыше 100 функциональных и конструктивных элементов, включая модели полупроводниковых приборов (транзисторов, диодов и др.) и обеспечивает возможность проектирования широкого класса СВЧ устройств:

- разветвителей (делителей) и сумматоров мощности;
- фильтров и ответвителей;
- транзисторных усилителей;
- диодных переключателей, аттенюаторов и т.д. с применением различных типов линий (микрополосковых, симметричных, с подвешенной подложкой и др.).

Пакет основан на применении двух уровней моделирования устройств: на основе метода Олинера и на основе теории длинных линий. С помощью другого пакета (**WF**) [58], разработанного той же фирмой, осуществляется моделирование волноводных СВЧ устройств:

- ферритовых фазовращателей для ФАР;
- ферритовых поляризаторов различного типа;
- устройств типа щелевого моста и двойного волноводного тройника;
- многослойных фильтров различного типа;
- сложных излучателей в бесконечной ФАР (модель в виде канала Флоке);
- фильтров и электромагнитных ловушек;
- различных устройств на основе Т- и П-волноводов, а также на копланарных, щелевых и многослойных полосковых линиях;
- волноводных нагрузок;
- устройств со сложным магнито - диэлектрическим заполнением.

При расчетах используются современные методы вычислительной математики: декомпозиция на базе многомодовой матрицы рассеяния, модифицированный метод Бубнова-Галеркина, метод сшивания и др. Одна из последних версий комплекса **WF**) описана в работе [59], а также в работе [61].

На рис. 17 изображена структурная схема программного комплекса. Программный комплекс WF состоит из трех блоков: графического интерфейса разработчика, системы моделирования и базы данных. Пунктиром обозначены отдельные модули и подсистемы, которые планируются к включению в новую версию пакета.

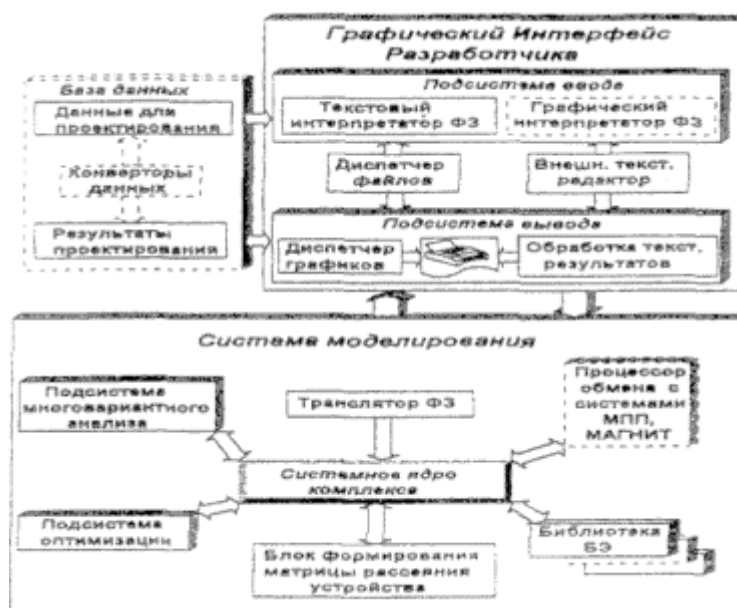


Рис. 17. Структура программного комплекса WF

Графический интерфейс пользователя, показанный на рис. 17, представляет собой графическую систему оконных меню, обеспечивающую взаимодействие и обмен информацией между системами пакета прикладных программ (ППП) WF. Интерфейс позволяет работать с файловой системой DOS (диспетчер файлов), редактировать текстовые массивы с помощью встроенного или вызываемого внешнего текстового редактора, осуществлять вызов системы моделирования, обрабатывать результаты проектирования (как текстовые, так и графические) с выходом на принтер.

Диспетчер графиков (Graphic manager), входящий в состав ППП, может быть использован и в автономном режиме для подготовки отчетов по результатам проектирования с возможностью ручного ввода данных.

Система моделирования предназначена для численного моделирования устройства, параметры которого задаются в формализованном задании (ФЗ). Различные режимы моделирования обеспечиваются подсистемами многовариантного анализа и оптимизации в соответствии с управляющими директивами ФЗ. Всем процессом моделирования и формирования матриц рассеяния устройств управляет системное ядро комплекса.

База данных имеет целью обеспечить накопление результатов проектирования (исследования), их просмотр с использованием, в частности, диспетчера графиков.

В основе пакета программ **WF** лежит принцип декомпозиции [59], при котором сложное устройство разбивается на ряд более простых базовых элементов (БЭ), описываемых своими многомодовыми S матрицами рассеяния и соединенных отрезками регулярных волноводов, которые могут иметь сложное в поперечном сечении феррито - диэлектрическое заполнение.

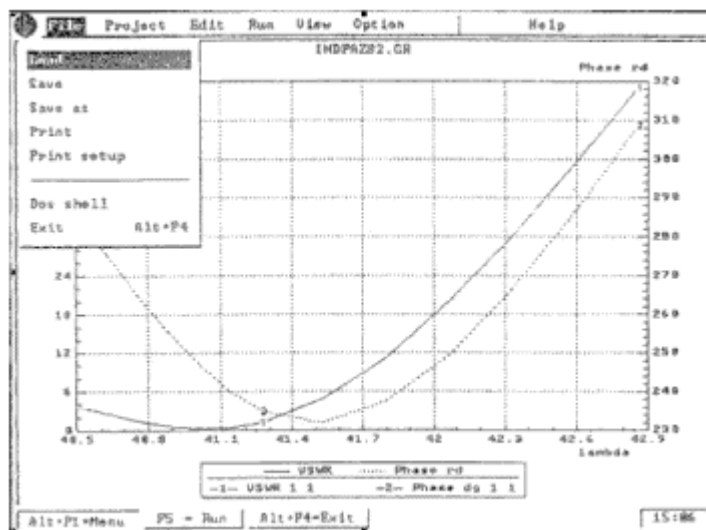


Рис. 18. Графический вид данных в интерфейсе программы WF

Нахождение матрицы рассеяния устройства по матрицам рассеяния базовых элементов осуществляется методом, описанным в работе [60].

В работах [61-63]) описан интегрированный программный комплекс (ИПК) **Лямбда +**, предназначенный для проектирования элементов и узлов радиоэлектронной аппаратуры СВЧ. В программный комплекс **Лямбда +** входят три системы моделирования:

- Система **WF** - для моделирования устройств СВЧ на основе прямоугольных и круглых волноводов с ферритовыми и диэлектрическими неоднородностями, волноводов сложной формы, коаксиальных и многослойных полосковых линий, волноводных стыков, диафрагм, штырей и т.д. В основу моделирования положены методы декомпозиции на базе многомодовой матрицы рассеяния Бубнова-Галеркина, сшивания и т.д.;

- Система **MPP** предназначена [64] для проектирования многослойных полосковых устройств СВЧ на основе разных типов передающих линий [65]. В ней осуществляется сквозной цикл проектирования от формализованного задания до выпуска управляющих программ для изготовления фотошаблонов в стандартных форматах: ЯГ.ГИ, ЯР-4, КПА-1200, DXF, PDF, ФНУ ЭМ-559. Библиотека базовых элементов содержит свыше 150 функциональных и конструктивных элементов, включая модели транзисторов и диодов, пленочных резисторов и т.д. Используются в основном два метода: метод теории длинных линий (до 4-5 ГГц) и метод Олинера (выше 5 ГГц).

- Протообразом системы MPP является пакет **ПРАМ-0,3** для ЕС ЭВМ, система **MAGNET**, обеспечивающая расчет характеристик плоскопараллельных, осесимметричных и трехмерных магнитных полей в линейных, нелинейных и гистерезисных системах, имеющих сложную конфигурацию границ раздела сред. В основу системы положен модифицированный метод конечных элементов. Комплекс **Лямбда +** имеет хорошо развитый пользовательский интерфейс. Она была приближена к системе Windows.

Большого внимания заслуживает разработка перспективных и в значительной степени оригинальных методов анализа и синтеза СВЧ-устройств (RLC сеток, метода $R-\tau$), включающих импедансный анализ электромагнитного поля (ИАЭП) - метод импедансного многополюсника, а также метод прямых [66], что обеспечило возможность создания универсальной электродинамической программы (УЭДП) [66, 67]. С ее помощью осуществлялось проектирование многих линейных СВЧ узлов: фильтров, делителей мощности, мостов, многоканальных антенн и т.д. как в микрополосковом, так и волноводном исполнении. Например, в работе [67] показаны возможности электродинамического расчета сложных СВЧ узлов без перехода к их низкочастотным прототипам и т.д.

Программа **TAMIC-1** [67], разработанная авторами перечисленных выше работ, позволяет осуществлять расчет характеристик неоднородностей многопроводных МПЛ, реберных и щелевых линий, а также копланарных волноводов. В ее основе лежит новый метод решения трехмерной электродинамической задачи для двух, отличающихся длиной, отрезков моделируемой линии передачи. Решение формируемой при этом системы матричных уравнений, содержащих параметры моделируемой линии, находится аналитически [66]. Приводятся примеры расчета характеристик одиночной полосковой линии и связанных микрополосковых линий.

САПР СВЧ-устройств **MW CAD** [68, 69] (Фрязино, НПО «Исток») позволяет:

- в режиме диалогового общения с РС рассчитывать в линейном режиме пассивные и активные СВЧ устройства (фильтры, направленные ответвители, усилители и т.д.), выполняемые в виде гибридных или монолитных интегральных схем;

- подготавливать управляющую информацию для изготовления фотошаблонов слоев ИС СВЧ;

- выпускать конструкторскую документацию, а также твердые копии графиков и таблиц, отражающих результаты расчетов характеристик ИС СВЧ.

Исходные данные для проектирования в этой САПР задаются:

- в диалоговом режиме,
- в графическом режиме,
- в пакетном режиме в виде файловой записи,
- в комбинированном режиме.

При расчете ИС учитываются анизотропия многослойной магнито - диэлектрической подложки, потери в металле и диэлектрике, взаимное влияние линий передачи, неравенство фазовых скоростей нормальных волн в связанных линиях.

Для описания электродинамических процессов в СВЧ устройствах применяется метод интегральных уравнений в сочетании с функциями Грина, что обеспечивает погрешность вычисления, не превышающую, по оценке авторов, 10%. Параметры регулярных отрезков передающих линий рассчитываются в квазистатическом приближении.

Параметры транзисторов могут задаваться:

- S или Y матрицами, измеренными в заданном частотном диапазоне;
- параметрами эквивалентной схемы транзистора;
- электрофизическими параметрами.

Расчет анализируемых схем в целом производится путем циклического сшивания Y матриц для всех их элементов. По результирующей Y матрице

находятся S матрица устройства и другие сигнальные характеристики. Предусмотрены возможности расчета шумовых характеристик и оптимизации. Подсистемы анализа, оптимизации, диалогового формирования формализованного задания, графической интерпретации результатов расчетов и синтеза элементов реализованы на языке FORTRAN-77. Объем ее программного обеспечения составляет около 4 Мбайт.

В подсистеме топологического проектирования в качестве графического редактора адаптирован пакет AutoCAD. Объем разработанного программного обеспечения этой подсистемы на языке "C" составляет 1 Мбайт, адаптированного пакета AutoCAD - 2 Мбайт.

Система **MWS версии 1.4** [70] осуществляет анализ и оптимизацию гибридных интегральных схем СВЧ на многопользовательских ЭВМ типа HP 310-370 с операционной системой ОС UNIX версии 6.2 и выше.

С помощью системы MWS рассчитываются:

- малошумящие транзисторные усилители;
- диодные фазовращатели, переключатели, аттенюаторы;
- полосно-пропускающие и полосно-заграждающие фильтры;
- направленные ответвители и т.д.

S-параметры схем представляются в формате Touchstone, что обеспечивает простоту обмена информацией с системами **Touchstone** и **MDS**.

Система обеспечивает:

- анализ и оптимизацию в диалоговом режиме многополюсных схем произвольной конфигурации;
- расчет S, Y, Z- матриц, коэффициента шума, группового времени задержки;

- табличное и графическое представление результатов в линейных и полярных координатах и на круговой диаграмме.

Имеется библиотека моделей ГИС СВЧ, а также шумовых и S-параметров всех основных отечественных биполярных и полярных СВЧ-транзисторов.

Система **MWS** содержит аппарат анализа спектральных и частотных характеристик нелинейных ГИС СВЧ, умножителей и преобразователей частоты, мощных усилителей и т.д.

Разработан пакет прикладных программ (**ППП**) по расчету характеристик устройств СВЧ на основе плоскопараллельных волноводов (**ППП SDCHF**) [71].

Пакет **ППП** ориентирован на расчет следующих характеристик:

- волноводно-щелевых делителей мощности;
- частотных разделителей сигнала;
- волноводных фильтров СВЧ (с количеством стержней или пластин до десяти).

Входная информация представляет собой совокупность геометрических параметров исследуемых устройств в электрических единицах, выходная – чертежи, таблицы данных, рассчитанные параметры. Программное обеспечение реализовано на языке FORTRAN -IV. Используется ЭВМ серии ЕС с ОС ЕС (версия 4.1 и выше), осуществляется перевод на IBM PC.

Осуществлена разработка очередной версии **ППП "Парус"** [72], предназначенного для сквозного (схемотехнического и топологического) цикла проектирования ИС и ГИС СВЧ. Эта разработка позволяет проектировать и анализировать СВЧ - устройства на основе их представления в виде принципиальных схем. Такой подход является

удобным для пользователя и существенно экономит его время при вводе исходных данных (по сравнению со случаем, когда исходные данные вводятся в виде матриц и при этом необходимо производить нумерацию внутренних узлов и ее редактирование). Построение схемы осуществляется с помощью "мыши". Схема может быть записана в память и использоваться повторно.

Результаты расчета выходных параметров - коэффициента передачи (ослабления или усиления), ФЧХ, входной и выходной импедансы и КСВН-выводятся в виде графиков и таблиц. Предусмотрена возможность их оптимизации.

В состав библиотеки входят микрополосковые линии (МПЛ) и полосковые линии (ПЛ), а также волноводно-щелевые линии передачи, шлейфы на МПЛ и ПЛ (в том числе секторные), неоднородности в ПЛ и МПЛ, сосредоточенные элементы R , L , C , задаваемые S -параметрами произвольные четырехполюсники, а также модели наиболее распространенных полупроводниковых элементов: полевых транзисторов серий 325, 326, 343, кремниевых биполярных транзисторов серии 3115 и др, $p-i-n$ - диодов. Предусмотрена возможность быстрого включения в библиотеку новых, записанных на языке FORTRAN, моделей.

По рассчитанной схеме осуществляется топологическое проектирование, включающее автоматическое формирование резисторов по заданным номиналам, масштабирование, ротацию и редактирование топологии, копирование ее фрагментов и т.д.

В Новосибирском электротехническом институте (НЭТИ) проводились комплексные работы по электродинамическому моделированию линий передачи ИС СВЧ, элементов и устройств на их основе. Особенностью этих работ являются обобщенная постановка и решение внутренних краевых задач

электродинамики строгими спектральными методами (методом частичных областей, методом прямых).

На этой основе разработан ППП **"Спектр"** [73], который позволяет осуществлять электродинамический анализ спектра собственных волн многослойных линий передачи (ЛП) ИС СВЧ, проводить расчет их волновых сопротивлений, а также осуществлять анализ скачкообразных неоднородностей.

ППП **"Спектр"** может быть реализован на ЕС ЭВМ, IBM PC как самостоятельно, так и в составе САПР. Он содержит более 180 различных процедур (около 7000 операторов). Программы записаны на одной из версий языка FORTRAN-IV. О разработке этой САПР сообщается в работе [74].

В основу комплекса программ анализа цепей СВЧ **MWSOLWER** [75] положен модифицированный циклический алгоритм вычисления матриц рассеяния сложных СВЧ устройств по S-матрицам входящих в них элементов.

Графическое представление результатов анализа для **АРМ САПР СВЧ** обеспечивается наличием постпроцессора **"Графика"**. Результаты расчета могут быть выведены на печать в соответствии с требованиями ЕСКД постпроцессором **"Документ"**. Используется операционная среда MS-DOS PC с ОЗУ объемом не менее 640 Кбайт. Например, расчет делителя мощности (схемы с 77 узлами) осуществляется в течение 30 с, с сопроцессором — в течение 3 с.

Программа автоматизированного анализа линейных радиотехнических схем **"Макет"** [76, 77], разработанная к.т.н. Мишустинным Б.А., производит расчет в частотном диапазоне матрицы рассеяния разветвленной радиотехнической схемы. В первую очередь, она предназначена для анализа

СВЧ устройств, представленных эквивалентными схемами. Исходная информация вводится путем заполнения таблиц, формируемых программой на экране терминала, предназначенных для задания характеристик частотного диапазона, сведений об используемых в устройстве элементах и для описания структуры соединения элементов. Имеется также дополнительная таблица, заполняемая численными значениями элементов матриц рассеяния (если эти элементы уже известны).

Библиотека программы **"Макет"** представляет собой совокупность подпрограмм, обеспечивающих вычисление (или ввод) в заданных точках частотного диапазона матриц рассеяния всех элементов, составляющих рассчитываемое устройство. Она содержит 54 элемента, представляющие собой двух-, четырех-, шести- и восьмиполюсники, описывающие одиночные и связанные линии передачи, скачки, разветвления линий, шлейфы, а также биполярные малосигнальные транзисторы.

Результаты расчетов представляются в виде таблиц или графиков. Объемом программы, записанной на языке FORTRAN-77, составляет примерно около 360 Кбайт. Программа может быть реализована на различных IBM-совместимых РС, включая отечественные, как с использованием сопроцессора, так и без него.

Известны и другие системы и программы для расчета линейных СВЧ устройств [78-85]. Необходимо также отметить ряд продуктов, которые были созданы и частично переведены на коммерческий уровень. Они получили широкое распространение в России. Это программа ЭДЭМ, созданная Давыдовым А.Г. (МТУСИ) [86] и программа Mirror [87] (авторы Лаврецкий Е.И., Кондратьев А.С., Чадов Е.С. (ОКБ МЭИ)).

Основу программы ЭДЭМ (ЭлектроДинамика Экранов из Металла, www.edem3d.ru) составляют алгоритмы численного решения интегральных

уравнений, к которым сводятся трехмерные и двумерные краевые задачи электродинамики для объектов, допускающих аппроксимацию набором проводящих поверхностей. В программе реализованы алгоритмы решения задач шести типов. Это трехмерные задачи для структур произвольной формы, плоские двумерные задачи для двух видов поляризации, задачи для поверхностей вращения с осесимметричным возбуждением, а также задачи для поверхностей вращения, в которых возбуждающее поле может быть представлено первой Фурье гармоникой по азимутальной координате.

Программа ЭДЭМ реализована в конце 1990-х годов в виде диалоговой системы для персонального компьютера и в значительной степени ориентирована на разработку антенно-фидерных устройств, исследование их функционирования, оптимизацию и т.д. Исследуемые структуры могут иметь практически произвольную конфигурацию, содержать поглощающие и импедансные пленки, сосредоточенные емкости и индуктивности, а также активные нагрузки.

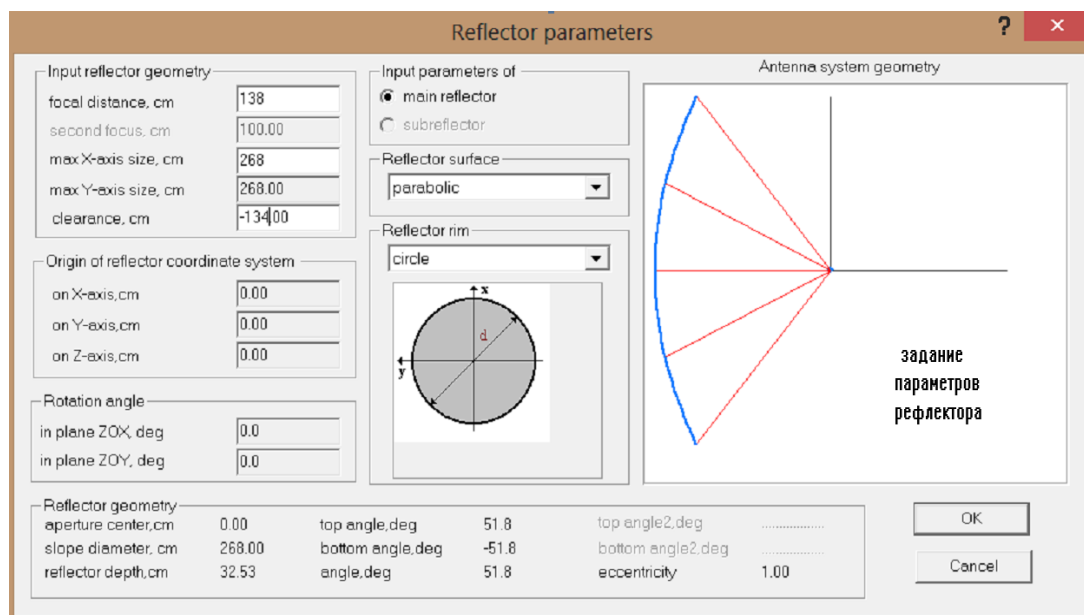


Рис. 19. Диалог программы Mirror для выбора геометрии рефлектора (выводится по команде Reflector)

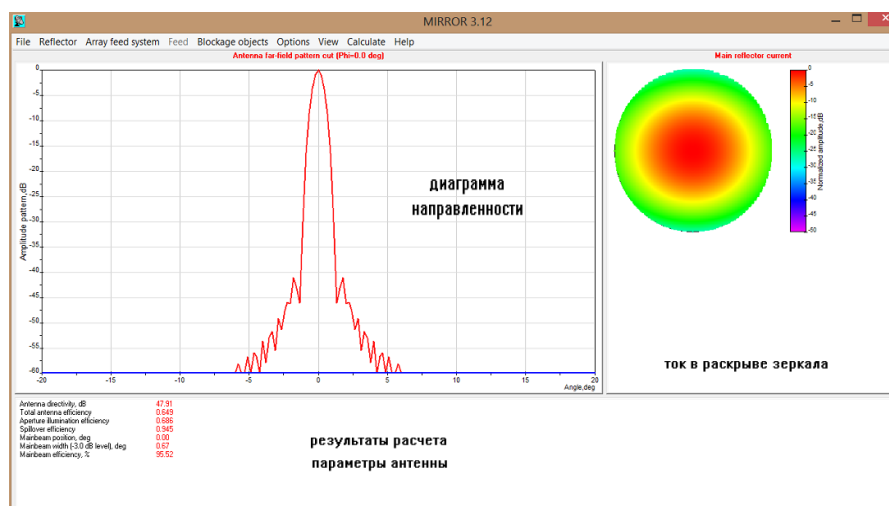


Рис. 20. Сечение ДН (слева) и ток в раскрытии апертуры зеркальной антенны (справа), рассчитанные в программе *Mirror*

Программа **Mirror**, разработанная в ОКБ МЭИ в 1998 г., предназначена для решения задачи облучения рефлектора системой излучателей. В связи с высокой скоростью обработки данных пользователи программы могут просчитать большое число вариантов уже на этапе эскизного проектирования (рис. 19-20).

В программе *Mirror* для расчета зеркальных антенн используется метод физической оптики. В ней предусмотрено создание до 32-х произвольно расположенных и ориентированных в пространстве объектов класса *Feed* (питающие антенны). Каждый из объектов этого класса, как и элемент фазированной антенной решетки (ФАР), может быть выбран пользователем следующим образом:

- табулированной диаграммой направленности (ДН), например, полученной экспериментальным путем;
- ДН, аппроксимированной аналитической функцией;
- простой моделью пирамидального рупора;
- электродинамической моделью гладкого конического рупора и конического рупора с изломом;

- электродинамической моделью многосекционного круглого и прямоугольного волноводов, которая позволяет получить любую геометрию рупорного облучателя, включая рупор с канавками.

Программа рассчитывает электрический ток, наводимый облучателем на поверхности рефлекторов, поле излучения объекта в ближней или дальней зонах и выводит результаты расчетов на экран.

В целом, оценивая уровень разработок в бывшем СССР и в Российской Федерации, необходимо отметить, что до начала девяностых годов он незначительно уступал уровню зарубежных работ. Определенное отставание было в области создания и коммерциализации законченных систем проектирования. В первую очередь, такое положение было обусловлено особенностями социально - экономической системы СССР, которая не стимулировала разработчиков к созданию тиражируемых систем и их распространению среди потребителей. По этой причине часто разрабатывались проблемно ориентированные САПР для удовлетворения нужд одного или нескольких предприятий. Такие разработки часто решали сравнительно узкие задачи, определяемые нуждами их пользователей. Также следует отметить заметное отставание в части создания удобных интерфейсов пользователя САПР.

При этом необходимо отметить очень высокий уровень, достигнутый в СССР в области численных методов решения задач проектирования СВЧ устройств и антенн. Сформировался ряд научных школ, отличавшихся высоким теоретическим уровнем. Среди них нужно отметить научную школу **Е.Н. Васильева** (МЭИ), развившую метод интегральных уравнений, школу **В.В. Никольского** (МИРЭА), в которой был создан оригинальный метод автономных блоков, школу **Б.В. Сестрорецкого** (МИЭМ), развивавшего методы на основе схемных моделей пространства.

Много работ в области математического моделирования антенн и, в частности, фазированных антенных решеток было выполнено в МАИ под

руководством **Д.И. Воскресенского**, который является основателем школы проектирования антенн разных типов.

Рядом авторов разрабатывались проблемно ориентированные численные методы. Среди них следует упомянуть **Г.И. Веселова** развивавшего метод частичных областей, **В.А. Неганова**, создавшего новые методы анализа полосковых и щелевых линий передачи на основе метода сингулярного интегрального уравнения, **А.М. Лерера**, который разработал новые подходы к моделированию структур с острыми кромками, основанные на применении полиномов Гегенбауэра.

Невозможно перечислить всех исследователей и разработчиков, участвовавших в решении рассматриваемого круга проблем. Отметим, что в области создания численных методов электродинамики отечественные работы часто определяли мировой уровень.

В девяностые годы финансирование работ в бывшем СССР в области создания численных методов, а также программных продуктов на их основе практически прекратилось. По этой причине революция в развитии электронно - вычислительной технике, приведшая к появлению персональных ЭВМ и стремительному росту их возможностей, не привела к появлению отечественных САПР коммерческого назначения. Рынок был практически полностью захвачен импортными системами. Такая ситуация за редкими исключениями остается неизменной до настоящего времени.

5. САПР СВЧ нелинейных схем

Задача автоматизированного проектирования нелинейных устройств была весьма актуальна на всех этапах развития САПР. Ее актуальность обусловлена важным местом, которое занимают нелинейные структуры в радиоэлектронике. К ним относятся: усилители, генераторы, умножители

частот, детекторы и т.д. В САПР нелинейных устройств используются методы сильно отличающиеся от методов анализа линейных схем. Моделирование линейных систем в настоящее время часто проводится на электродинамическом уровне. Методы анализа нелинейных процессов до сих пор совместить с электродинамическими подходами совместить не удастся. Поэтому САПР, ориентированные на нелинейные устройства оправданно выделяют в отдельную группу. В данном разделе мы кратко остановимся на некоторых зарубежных и отечественных программных системах такого типа.

Программа **CHANES - PC** [56-58] является ориентированной на персональные компьютеры системой, предназначенной для проектирования диодно-транзисторных, гибридно-интегральных и монолитных схем аналоговых устройств электроники и СВЧ техники. Эта система позволяет проводить полный анализ линейных и нелинейных схем в статическом и динамическом режимах. Предусмотрены возможности многовариантного анализа. Основным математическим аппаратом является метод нелинейного спектрального анализа при нескольких воздействующих сигналах [56-58], основанный на идеях гармонического баланса линейных и нелинейных систем.

Основной информацией для вычисления характеристик нелинейной схемы являются спектральный состав напряжений и многомерная Y -матрица на сетке воздействующих и комбинационных частот, полученных на любом участке схемы.

Рассчитываются следующие параметры: амплитуды напряжений всех комбинационных гармоник, участвующих в нелинейном взаимодействии, коэффициенты передачи мощности, гармонических искажений напряжения, интермодуляционных искажений, а также входное сопротивление, коэффициент отражения и КСВН.

В более поздних версиях **CHANES-PC** возможны:

- параметрическая оптимизация;
- статистический анализ;
- анализ шумов;
- учет влияния факторов окружающей среды.

Система имеет модульную структуру, в состав которой входят модули ввода исходных данных, декомпозиции схемы, синтеза сетки частот, формирования и редукции уравнений линейной части схемы, формирования и решения моделей нелинейной части схемы, диагностики, а также библиотеки моделей элементов, библиотеки качественных показателей и другие модули. Открытая архитектура системы обеспечивает возможность подключения различных сервисных пакетов на входе и выходе системы и дополнения библиотеки новыми моделями элементов и качественных показателей.

Большинство модулей написаны на языке FORTRAN-7.7. Пакет **CHANES** позволяет идентифицировать модели ПТШ по измеренным S-параметрам.

Для использования системы были необходимы:

- оперативная память объемом не менее 640 Кбайт;
- MS DOS версии 3.20 и выше (версия 5.0);
- жесткий диск (внешняя память объемом 1.3 Мбайт);
- адаптер CGA;
- транслятор языка MS FORTRAN версии 5.0.

Желательно наличие сопроцессора.

Система была существенно модернизирована. В 2000-х годах имелось три версии системы **CHANES-PC**:

- промышленная для проектирования гибридных и монолитных устройств и их изготовления;
 - учебная, аналогичная промышленной, но имеющая ограничения на число узлов схемы и нелинейных моделей элементов;
 - версия, предназначенная для создания и идентификации линейных и нелинейных моделей элементов схем электроники (и оптоэлектроники).
- Эта версия может быть также использована как электронный справочник параметров активных приборов и устройств в характерных режимах работы.

Структура этих версий одинакова. Она включает в себя три основных программных модуля: графический редактор, вычислительный пакет, пакет обработки и вывода полученной при вычислениях информации.

Вызов и работа отдельных модулей и системы в целом организованы с использованием иерархической системы меню. Существует главное меню и несколько уровней иерархии. Главное меню включает разделы FILE (файл), CIRCUIT (схема), TASK (задание), SOLVE (расчет), GRAPHICS (вывод информации). Меню CIRCUIT это, по существу, графический редактор с совмещением функции текстового редактора, позволяющего осуществлять вывод любых текстовых записей и знаков ASCII. Одновременно с помощью этого меню осуществляется ряд управляющих функций.

Меню TASC, включающее семь подменю, позволяет составлять и редактировать задание на моделирование и проектирование (в текстовом виде или диалоговом режиме). С помощью этого меню задаются частотный диапазон, множество частот, параметры элементов схемы и моделей, параметры оптимизации, а также состав характеристик (качественных показателей), подлежащих расчету.

Меню Solve осуществляет запуск задания на расчет. За процессом решения можно наблюдать по графической и текстовой информации на

дисплее, оценивать невязку, скорость расчета, сходимость и т.д. Можно также прерывать процесс решения.

Используя меню GRAPHICS, можно получить информацию в виде:

- спектрограмм токов и напряжений на элементах и в узлах схемы;
- таблиц значений рассчитанных параметров;
- графиков полученных зависимостей;
- временных функций токов и напряжений на элементах и узлах схемы.

Возможно получение 3-мерной графики, круговых диаграмм и спектрограмм Система CHANES-PC была реализована в операционных системах DOS и Windows 95. В работе [71] дан пример расчета транзисторного усилителя с представлением меню и соответствующей информации на экране монитора.

Разработан также, базирующийся на методах диакоптики, пакет **ANALIZ**, предназначенный для анализа линейных и параметрических устройств в режимах малого и большого сигналов [54].

Комплекс **ПРАММИС** [55,95] предназначен для автоматизированного проектирования линейных и нелинейных радиочастотных и микроволновых интегральных схем в гибридном и монолитном исполнении. В линейном режиме выполняются анализ, расчет параметрической чувствительности и многокритериальная оптимизация сигнальных и шумовых характеристик, а в нелинейном режиме расчет схемы при большом сигнале осуществляется методом гармонического баланса. Комплекс состоит из схемного редактора, подсистемы синтеза фильтров, блока преобразования схем, блока вывода результатов в графической форме, подсистемы анализа и оптимизации линейных схем, подсистемы анализа нелинейных схем,

Предусмотрен графический и текстовый ввод исходных данных посредством проблемно-ориентированного входного языка в формате

TOUCHSTONE. Сигнальные характеристики анализируемых устройств описываются S- или Y-матрицами, а шумовые характеристики T-матрицей.

Характеристики транзисторов задаются при помощи матриц или эквивалентных схем, которые могут быть включены в библиотеку в виде файла прямого доступа. Шумовые свойства транзистора задаются коррелированными источниками тока.

Подсистема линейного анализа состоит из блоков расчета сигнальных характеристик, вычисления параметрической чувствительности и оптимизации. Анализируемая схема описывается матрицей проводимости. Система уравнений решается методом LU- разложения.

В комплексе реализовано вычисление прямого и обратного коэффициентов передачи мощности, коэффициента шума, фазовой характеристики, КСВН, коэффициента отражения на входе и выходе, S- и T- параметров и коэффициента устойчивости произвольного четырехполюсника, матрицы проводимостей произвольной подсхемы. Библиотека моделей является открытой, в неё включены верифицированные до частоты 20 ГГц модели несимметричных МПЛ и неоднородностей. Предусмотрено встраивание программ расчета любых базовых элементов, написанных на языке FORTRAN-77.

В блоке оптимизации используются высокоэффективные градиентные методы. В диалоговом режиме решается задача многокритериальной минимаксной оптимизации. Возможны три вида требований к входным характеристикам:

- получение характеристик, наиболее близких к заданным разработчиком;
- обеспечение заданных верхнего и нижнего уровней ослабления (для фильтров);
- минимизация коэффициента прохождения вне рабочей полосы.

В комплексе реализованы подсистема синтеза согласующих цепей многокаскадных транзисторных усилителей и подсистема синтеза фильтров на основе использования сосредоточенных элементов, четвертьволновых трансформаторов и широкополосных чебышевских цепей с преобразованием активной составляющей импедансов трансформаторами Нортон. При анализе нелинейных схем, последние представляются в виде линейного многополюсника с подключенными к нему нелинейными элементами. Матрица проводимостей линейной части рассчитывается с помощью блока линейного анализа. Уравнения гармонического баланса для нелинейной части решаются методом Ньютона. Подсистема нелинейных схем позволяет моделировать усилители мощности и смесители. Она находится в стадии опытной эксплуатации.

Комплекс **ПРАММИС** может быть записан на трех дискетах: одна в 1,2 Мбайт и две - по 360 Кбайт. Для его эксплуатации необходим персональный компьютер типа IBM с сопроцессором.

САПР аналоговых нелинейных радиоэлектронных устройств ВЧ и СВЧ диапазонов (**АНРУС**) [96, 97] позволяет осуществлять анализ усилителей, умножителей и делителей частоты, автогенераторов, модуляторов, детекторов и других нелинейных устройств.

Система содержит:

- интерактивную оболочку, позволяющую конфигурировать и вызывать все подсистемы;
- подсистему схемотехнического моделирования нелинейных устройств в статистическом и динамическом режимах во временной и спектральной областях;
- подсистему ввода принципиальных схем и топологий устройств в диалоговом, графическом и пакетном режимах;

- графическую подсистему визуализации результатов моделирования;
- базу данных для нелинейных радиокомпонентов (около 400 типов транзисторов и диодов);
- интеллектуальную подсистему выбора методов анализа и маршрутов моделирования нелинейных устройств и др.

Система содержит 300 программных модулей и позволяет осуществлять анализ (в малосигнальном режиме) Y и S параметров, собственных шумов схемы, отнесенных к входу и выходу, устойчивости схемы к воздействию внешних и внутренних параметров, нелинейных искажений, температурных зависимостей и т.д.

Ввод данных в графическом режиме осуществляется по правилам представления схем и топологий в системах OrCAD и PCAD. В системе используются методы гармонического баланса, рядов Вольтерра и узловых потенциалов. Объем анализируемых схем - до 200 компонентов и 400 узлов эквивалентной схемы при количестве активных элементов до 50 единиц.

Для эксплуатации системы необходим IBM PC (или совместимый с ним) с оперативной памятью 570 Кбайт и жестким диском для записи программного обеспечения объемом 5 Мбайт.

САПР **АНРУС** является первой САПР в России для проектирования нелинейных СВЧ схем и по основным характеристикам не уступает САПР ведущих зарубежных фирм, таким как **MW-Harmonica** и **Libra**. Осуществлялись работы:

- по созданию подсистемы идентификации параметров моделей полевых транзисторов;
- по созданию программ расчета импедансов и устойчивости в режиме большого сигнала;

- по численному моделированию нелинейных устройств при многочастотном воздействии;
- по созданию графического редактора топологического проектирования монолитных интегральных схем СВЧ на GaAs.

В программе **САПР MIC Optimizer** [98-100] анализ во временной и частотной областях осуществляется на основе модифицированного метода узловых потенциалов. Это позволяет описывать базовые элементы (БЭ) с помощью Y матриц и успешно разрабатывать эквивалентные схемы активных и пассивных БЭ СВЧ. При анализе схем во временной области используется метод переменных состояния. Нелинейные дифференциальные уравнения схем составляются на основе матриц узловых проводимостей и емкостей. В частотной области используется их линейная сумма - комплексная матрица узловых проводимостей. Значения элементов эквивалентных схем активных и пассивных БЭ определяются в зависимости от величины прикладываемых к ним напряжений и частоты.

В САПР используются известные модели полевых транзисторов (Куртиса, Штатца) и биполярных транзисторов (Гумеля-Пуна). Возможен учет влияния индивидуального разогрева активных элементов на основе использования уравнений тепловой релаксации.

Анализируемые схемы могут содержать отрезки микрополосковых, копланарных и щелевых линий передачи, а также многослойных связанных линий с потерями. Возможен выбор метода их расчета: по замкнутым приближенным формулам, на основе решения электростатической задачи с поправкой на дисперсию или спектральным методом. Реализован алгоритм глобальной оптимизации с учетом линейных и нелинейных свойств анализируемых схем.

Из материалов конференции по объемным интегральным схемам известно о разработке новой перспективной САПР [100]. Для анализа нелинейных устройств был разработан комплекс программ [101] на Турбо-Паскале для IBM PC (МГПИ им. В.И.Ленина), позволяющий осуществлять анализ стационарных режимов нелинейных устройств во временной области, рассчитывать на их основе характеристики моделей и спектральный состав динамических переменных, а также аппроксимировать экспериментальные зависимости путем оптимизации. Значительная часть выходной информации выдается в графическом виде.

Комплекс позволяет рассчитывать S параметры активных четырехполюсников при малых и больших сигналах и исследовать работу усилителей мощности, умножителей частоты, автогенераторов на полевых и биполярных транзисторах. Комплекс позволяет также расширить возможности радиотехнического эксперимента, в частности, позволяет исследователю наблюдать форму сигнала в узлах эквивалентной схемы, недоступных экспериментатору. Разработанный комплекс может быть использован в качестве САПР СВЧ устройств.

Заслуживает внимания положенный в основу одной из САПР алгоритм анализа нелинейных СВЧ схем, основанный на сочетании частотных и временных методов расчета [102, 103]. Расчет по этому алгоритму производится в четыре этапа:

- формирование линейных эквивалентных многополюсников (ЛЭМ);
- вычисление частотных характеристик ЛЭМ;
- моделирование нелинейных элементов;
- решение систем нелинейных интегродифференциальных уравнений.

Выражения для элементов Z и Y матриц ЛЭМ находятся методом подсовмещения по известным выражениям для частотных характеристик линейных

элементов (отрезков линий передачи, элементов R , L , C), включенных в многополюсник. В результате применения БПФ к каждому элементу Z и Y матриц вычисляются матрицы импульсных характеристик $G(t)$. Через них с помощью интегралов Дюамеля находится система компонентных уравнений, связывающих мгновенные значения токов и потенциалов.

На основе использования топологической матрицы, описывающей взаимное соединение элементов, а также их компонентных уравнений, записываются уравнения Кирхгофа. Решение этих уравнений во временной области методом неявного интегрирования формулы дифференцирования назад (ФДН) позволяет рассчитывать временные формы токов и потенциалов в схеме в переходном и установившемся режимах, а следовательно, и любые интегральные характеристики схемы.

Кроме САПР общего применения, описанных выше, было разработано большое количество специализированных САПР и программ для проектирования различных видов СВЧ устройств и систем. В частности, в рекламном сообщении [104] содержатся сведения о ППП для проектирования комплексов радиозондирования среды, обладающем элементами искусственного интеллекта.

ППП состоит из двух частей, обеспечивающих:

- расчет основных параметров радиозондирования комплекса;
- моделирование и расчет системы обработки сигналов.

Имеется возможность осуществить полный расчет и моделирование основных сигнальных и шумовых параметров системы, содержащей цифровые фильтры. Пакет реализован на IBM совместимых ПЭВМ. Его объем 500 Кбайт, требуемый объем ОЗУ - 200 Кбайт.

Заслуживают внимания программы "**Микро**" [105], предназначенное для моделирования СВЧ приемников, а также программа **Falcon**, разработанная в Московском энергетическом институте на кафедре радиопередающих устройств. Она обладает высоким быстродействием благодаря оригинальному алгоритму, в основу которого положен так называемый метод поэлементного подключения [106].

В работе [107] приводятся сведения о системах, используемых в метрологии со специальной оболочкой для САПР измерительных систем [108,109]. Входной информацией для расчета являются электрофизические параметры диодов и транзисторов, для которых по стандартным эквивалентным схемам формируются их нелинейные уравнения, номиналы элементов с сосредоточенными параметрами, геометрические размеры отрезков длинных линий, параметры независимых генераторов и топологическая матрица исследуемой схемы.

К положительным особенностям алгоритма относятся быстрота расчета, обусловленная отсутствием дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих элементы с распределенными параметрами, его универсальность, полнота анализа, удобство описания элементов и возможность использования для анализа экспериментальных частотных характеристик элементов.

6. Средства проектирования и программные продукты последнего поколения

Период интенсивного развития САПР СВЧ поднял технологию автоматизированного проектирования на новый уровень, казавшийся еще совсем недавно недостижимым. На рынке программных продуктов определились лидеры, удерживающие основную его часть. К ним относятся следующие компании: Agilent, Computer Simulation Technology (CST), Ansoft,

Mentor Graphics, Sonnet Software, Applied Wave Research. В табл. 1 представлены характеристики наиболее популярных программных продуктов указанных фирм в области СВЧ САПР.

Табл. 1. Некоторые параметры коммерческих ВЧ и СВЧ САПР

Программа	Компания	Базовый метод	Решение задач
HFSS ANSYS	ANSYS	FEM в частотной области	Трехмерное электродинамическое моделирование антенн и пассивных СВЧ устройств произвольной геометрии
CST Microwave Studio	Computer Simulation Technology	FIT	
FEKO	EM Software&Systems –S.A. (Pty) Ltd	Гибридизация методом MOM, FEM, PO, GO и UTD	
IE3D SSD	Mentor Graphics	MOM в частотной области	
Sonnet	Sonnet Software	MOM	
XFdtd	REMCOM	FDTD во временной области	
Momentum	Agilent EEs of EDA	MOM в частотной области	Моделирование планарных ЕМ структур
Advanced Design System	Agilent EEs of EDA	MOM в частотной области	Моделирование активных и пассивных ЕМ структур
Microwave Office	AWR Corporation		

Следует отметить, что в настоящее время применение в САПР приближенных методов, таких как метод Олинера или теория СВЧ линий передачи стремительно сокращается. На первый план выходят численные методы электродинамики, позволяющие получать параметры СВЧ устройств и антенн с контролируемой точностью. При этом необходимо иметь ввиду, что приближенные методы не исчезнут из САПР полностью. Меняется их место в общей иерархии инструментов, предоставляемых проектировщику. Раньше

они были практически единственной возможностью получить приемлемую по точности оценку параметров сложных СВЧ структур. Сейчас благодаря росту производительности компьютеров стало возможным строгое решение граничных задач. Однако, такое решение требует весьма значительных затрат компьютерных ресурсов. Оно плохо пригодно для быстрой оценки показателей качества разрабатываемого устройства. Также с ним трудно проводить перебор большого числа вариантов. Решение таких задач, по-видимому, еще долго будет осуществляться при помощи приближенных, относительно простых моделей.

Тем не менее, в последние десятилетия основной тенденцией в развитии САПР было внедрение в них численных методов электродинамики. Из табл. 1 видно, что в настоящее время наиболее популярны следующие методы: метод моментов (MOM), метод конечных элементов (МКЭ) и метод FDTD (finite difference time domain). Ниже мы постараемся кратко охарактеризовать программы из табл. 1, объединяя их по признаку применяемого метода решения граничных задач.

6.1. Программы, использующие метод конечных элементов

МКЭ или finite element method (FEM) широко использовался в механике и термодинамике. В современной форме пригодной для создания компьютерных алгоритмов он был сформулирован в пятидесятые годы XX века, хотя математическая база развивалась значительно раньше. Первое применение в электромагнетизме было осуществлено в конце шестидесятых годов. Как в случае его основного конкурента - метода FDTD, МКЭ успешно применяется для анализа структур с неоднородными материалами и сложной конфигурации. Метод предназначен для прямого решения дифференциальных уравнений в частных производных. В случае СВЧ структур роль таких уравнений играет система уравнений Максвелла.

Пространство в рамках МКЭ дискретизируется. При этом используется сетка, состоящая из конечных элементов, чаще всего тетраэдров в трехмерном случае и треугольников в двумерном. Треугольники и тетраэдры имеют ряд преимуществ перед другими элементарными ячейками, так как при их помощи удается с большей точностью осуществить дискретизацию тел сложной формы.

Традиционно МКЭ в электродинамике применялся в частотной области, то есть для решения стационарных задач. Отметим, что во временной области он также использовался для специализированных приложений [110-113] .

Среди коммерческих продуктов, использующих МКЭ выделяется система HFSS Ansoft, считающаяся лидером рынка. Рассмотрим линейку продуктов этой фирмы на основе МКЭ более подробно. До 2005 года фирмой разработчиком первых версий HFSS являлась всемирно известная компания Hewlett Packard. С 2005 года программа электродинамического моделирования HP HFSS перешла в компанию Ansoft (<http://www.ansoft.com>) и стала называться HFSS ANSOFT, сначала версия HFSS-9, затем версии HFSS-10...13. В 2010 году была создана 64-битовая версия HFSS-14, а затем HFSS-15. Затем произошел качественный скачок, связанный с появлением HFSS ANSYS - 16 который является системой, включающей несколько программ, реализующих разные методы решения граничных задач электродинамики (рис. 21).

В их число входят: МКЭ, метод интегральных уравнений (IE), физической оптики (PO), метод конечных элементов во временной области (FDTD). Таким образом, мы можем наблюдать тенденцию к конвергенции разных методов. Она наблюдается не только в продуктах фирмы Ansoft. Аналогичные изменения происходят и с продукцией фирмы CST.

Объединение разных методов в одном проекте открывает новые возможности для разработчика СВЧ техники, позволяя ему выбрать оптимальный для каждого типа устройств метод.

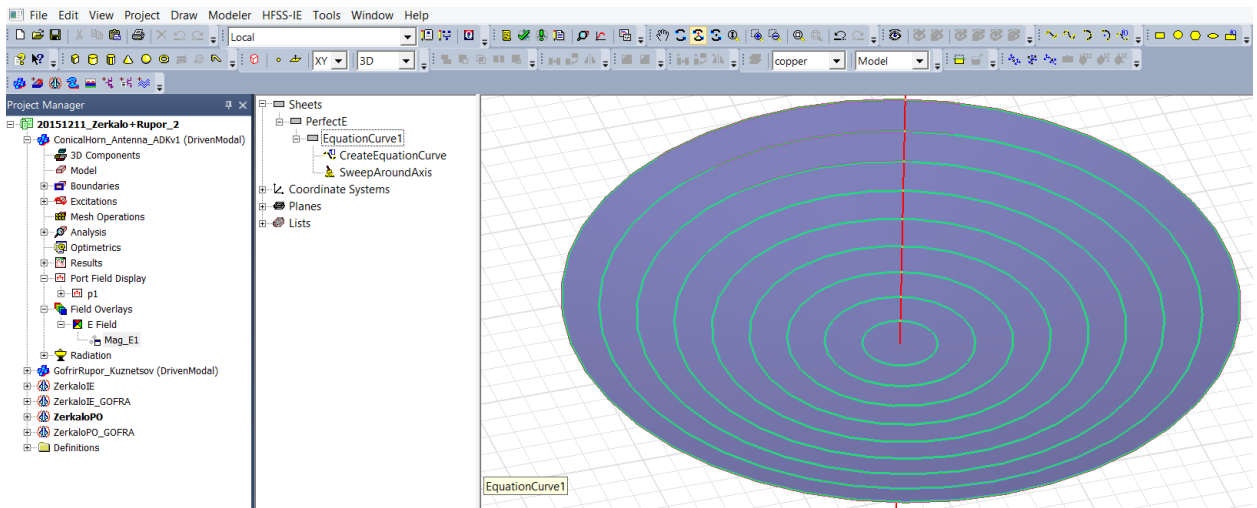


Рис. 21. Интерфейс программы HFSS ANSYS – 16 с задачей расчета зеркальной антенны, возбуждаемой гофрированным рупором

6.2. Программы, использующие метод конечных разностей во временной области (FDTD)

Метод конечных разностей во временной области (FDTD) начинает обсуждаться в научной литературе в шестидесятых годах, как и МОМ и МКЭ [113-114]. Подобно МКЭ он основан на решении дифференциальных уравнений в частных производных, и не нуждается в функции Грина.

В отличие от МКЭ, метод FDTD не использует минимизацию вариационных функционалов, или вычисление взвешенных остаточных разностей. FDTD непосредственно аппроксимирует дифференциальные операторы в уравнениях Максвелла, на сетке, которая вводится во времени и пространстве. Поля **Е** и **Н** вычисляются на регулярной сетке, с дискретизацией по пространству с шагом Δs в моменты времени, следующие с заданным шагом Δt . При этом численное дифференцирование первого порядка обеспечивает точность второго порядка. Схема FDTD - единственная широко используемая схема МКЭ работающая во временной области.

По различным причинам, метод FDTD в практических разработках не использовался в шестидесятые и семидесятые годы, но стал очень популярным в восьмидесятых годах. Применение FDTD стимулировали две задачи: моделирование неоднородных сред, в частности оценка влияния поля на тело человека, и разработка технологии “Стэлс”. Важным фактором, объясняющим популярность FDTD [135-140] служит прямая зависимость его эффективности от производительности компьютеров, которая резко начала расти в указанный период времени. Дескриптор "Finite-difference time-domain" и соответствующее обозначение "FDTD" было предложено **Allen Taflove** в 1980 г.

Разработка **J. Berenger** идеально согласованного слоя в 1994 году решила задачу создания поглощающей поверхности и позволила применить метод FDTD для анализа излучающих структур и антенн. Таким образом, было устранено последнее препятствие к широкому применению метода в универсальных САПР. В новом тысячелетии, с появлением персональных компьютеров с ОЗУ в сотни гигабайтов, доступных за относительно низкую цену, метод FDTD твердо утвердился как один из наиболее популярных методов среди разработчиков и в научном сообществе.

Следует отметить простоту основного алгоритма FDTD. Она определяет его популярность среди аспирантов и студентов в университетах». На первых этапах FDTD критиковали именно за отмеченную выше простоту, считая, что он дает “решение в лоб”. Однако, отсутствие математической элегантности и тонкости было компенсировано эффективностью численных решений, получаемых при помощи FDTD. Большинство инженеров, решающих сложные задачи больше интересуются тем, как работают программы, а не тем, какие изящные формулы и алгоритмы применяются в них. Поэтому метод FDTD был чрезвычайно успешен во многих приложениях.

Метод FDTD реализован в коммерческих версиях таких систем как CST MWS STUDIO и XFDTD REMCON. Они используют алгоритмы очень близкие к FDTD.

В последнем продукте компании CST мы можем наблюдать отмеченную выше тенденцию конвергенции разных методов решения электродинамических задач. В программе компьютерного моделирования **CST SUITE** (<http://www.cst.com>) используются как метод FDTD, так и методы интегральных уравнений (IE) и МКЭ в частотной области. С их помощью реализуются такие важные опции, как расчет собственных значений в блоке Eigenmode и асимптотические решения в блоке Asimptotic. Программа CST-5 на основе метода FDTD, появившаяся на рынке в 2005 году, быстро завоевала популярность среди разработчиков СВЧ устройств. Затем ей на смену, ежегодно приходили новые версии: CST-2007, CST-2008, CST – 2010.... CST-2014, CST-2015.

Сейчас система CST включает блоки CST MWS (СВЧ структуры), CST EM Studio (многослойные структуры), CST Particle Studio (потoki частиц), CST MPhysics Studio, CST Design Studio, CST PCB Studio (многослойные печатные схемы), CST CABLE STUDIO (кабельные линии), CST Microstripes (микрополосковые линии).

6.3. Программы, использующие метод моментов (FEKO)

Применению MOM для анализа СВЧ устройств и антенн дала импульс поддержка правительством США, которое в конце восьмидесятых финансировало разработку программы, использующую метод моментов. Она известна как NEC-2. NEC-2 - мощная, универсальная программа моделирования антенн, но без графических возможностей, и с очень несовершенным генератором сетки.

В более поздней версии программы NEC-4 были устранены отмеченные выше недостатки и появились некоторые специальные функциональные возможности. В настоящее время, имеются программные коды, которые реализуют все функциональные возможности NEC-2, но с надлежащими графическими инструментальными средствами пользователя и часто значительно расширенными возможностями. На их основе разработаны следующие САПР: SuperNEC, Ensemble, и IE3D. Только SuperNEC является прямым потомком NEC, другие системы выполнены независимо, но в рамках той же концепции.

Система **FEKO** (<http://www.feko.info>) также была разработана на основе метода моментов. Теоретические основы этой программы берут начало в докторской диссертации **М. Jakobus** из университета Штутгарта в Германии в начале девяностых годов. FEKO - это акроним немецкого имени **F**eldberechnung bei **K**örpern beliebiger **O**berfläche, который переводится как полевые вычисления для тел произвольной формы.

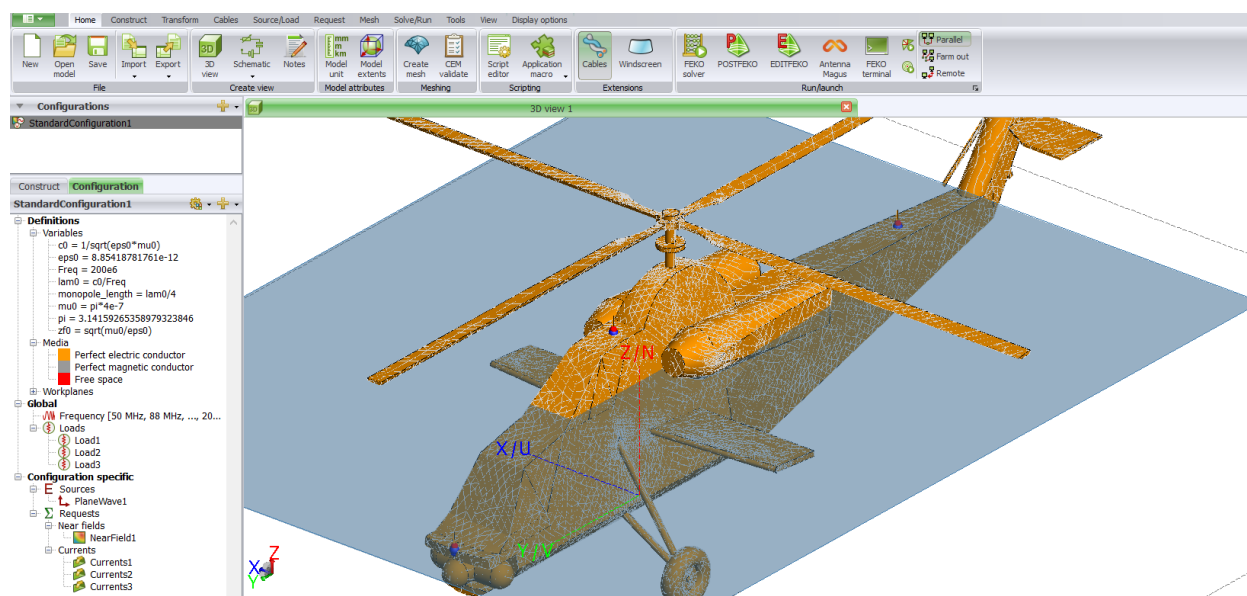


Рис. 22. Интерфейс программы FEKO-7 и объект большого размера (вертолет) на котором решается задача электромагнитной совместимости

Метод моментов тесно связан с методом интегральных уравнений [93]. Одним из его достоинств является простота, с которой он интегрируется с асимптотическими методами электродинамики, такими как методы физической оптики, геометрической оптики, геометрической теории дифракции. Асимптотические методы применяются для решения дифракционных задач рассеяния на телах больших электрических размеров, когда другие методы, такие как МКЭ и FDTD неприменимы. Впервые в коммерческих САПР эти методы были реализованы в FEKO.

Сейчас FEKO представляет собой интегрированную систему электродинамического моделирования, включающую разные методы решения электродинамических задач. Наибольшая универсальность достигнута в программах FEKO версий 5.5 – 7.0. С ними в тандеме работает программа **Antenna Magus**, которая представляет собой банк данных более чем 150 антенн, позволяющая выполнить первоначальный синтез структуры на основании заданных характеристик антенны, включая диаграмму направленности.

Программа постпроцессорной обработки POSTFEKO выполняет вывод данных на графики и их обработку с использованием макросов. Программа EDITFEKO позволяет вводить исходные данные в смешанном режиме: при помощи стандартного меню и при помощи макросов. При этом появляются возможности удобного задания параметров сложных многоэлементных структур, таких, например, как логопериодические антенны.

6.4. Программа Comsol Multiphysics

Система COMSOL представляет собой новый этап в развитии многофункциональных САПР последнего поколения [143]. Это мощная программа для моделирования и решения разных типов научных и инженерных задач, позволяющая моделировать не только электромагнитные

процессы в исследуемых и разрабатываемых объектах, но также осуществлять моделирование связанных с ними процессов другой физической природы, например, тепловых процессов [144], электронных пучков и т.д. (см. www.comsol.com).

Программа была разработана в начале 2000 годов в Швеции, в Королевском техническом Университете (авторы Литман и Суиди). Затем она совершенствовалась большим коллективом программистов и исследователей фирмы Softline (президент Карл Битнер). Программа Comsol первоначально формировалась как дополнение к MathLab, а затем включила все функции расчета уравнений в частных производных в собственный код.

В программе **Comsol Multiphysics** можно обычные, "традиционные" СВЧ объекты, например фильтр, включить в "мультифизическую" модель, например в условия безвоздушного пространства, что позволяет анализировать вновь появившиеся физические явления. Доступ к этим мощным возможностям не требует углубленного знания математики или численного анализа.

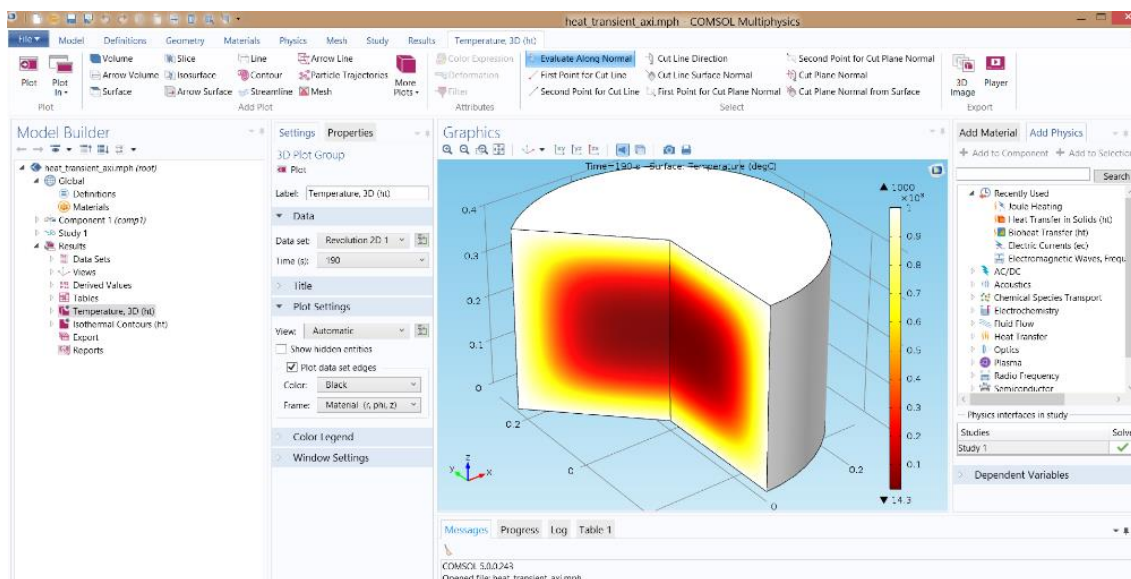


Рис. 23. Расчет теплового потока в программе COMSOL

COMSOL Multiphysics позволяет добавлять произвольные уравнения, характеризующие свойства материалов, вводить граничные условия и отдельные члены уравнений, описывающие источники и теплоотдачу, и даже системы уравнений в частных производных. На основе введенных уравнений могут создаваться новые физические объекты (рис. 23).

Среда разработки приложений позволяет дополнять приложения пользовательскими интерфейсами на основе ваших собственных моделей. Такой пользовательский интерфейс может представлять собой упрощенную версию модели, либо содержать часть полей ввода и вывода, которые необходимо сделать доступными для пользователя. Кроме того, в состав COMSOL Multiphysics входит модуль COMSOL API для пользователей с Java, что открывает дополнительные возможности интеграции моделей COMSOL Multiphysics с другими приложениями.

С помощью встроенных интерфейсов *Physics Interfaces* и расширенной поддержки свойств материалов, можно создать модели, задавая соответствующие физические величины, такие как разнообразные характеристики материалов - плотность, упругость, нагрузки, граничные условия, источники тепла и тепловые потоки. Можно использовать переменные, выражения или заданные константы для описания областей твердых и жидких тел, их параметров на границах, ребрах и точках независимо от сетки разбиения. После этого **Comsol** компилирует систему уравнений, представляющих всю модель.

С помощью *Physics Interfaces* можно выполнять различные виды исследований, в том числе:

- Расчет установившегося и зависящего от времени переходного процесса;
- Линейные и нелинейные исследования;
- Исследования собственных частот, типов волн и частотных характеристик.

Программа выполняет анализ, начиная с разбиения пространства на сетку, выполняя контроль ошибок с использованием различных численных программ. Расчеты, выполняемые COMSOL могут делиться на потоки вычислений общей задачи, выполняться параллельно, для чего можно использовать многопроцессорные системы.

Для доступа к расширенным функциям САПР имеется дополнительный модуль CAD Import (импорт данных из САПР) и продукты LiveLink для САПР. Они поддерживают возможности моделирования геометрии за счет геометрического ядра Parasolid и предлагают ряд форматов САПР для импорта и экспорта, а также возможность взаимодействия с ведущими системами САПР (рис. 24).

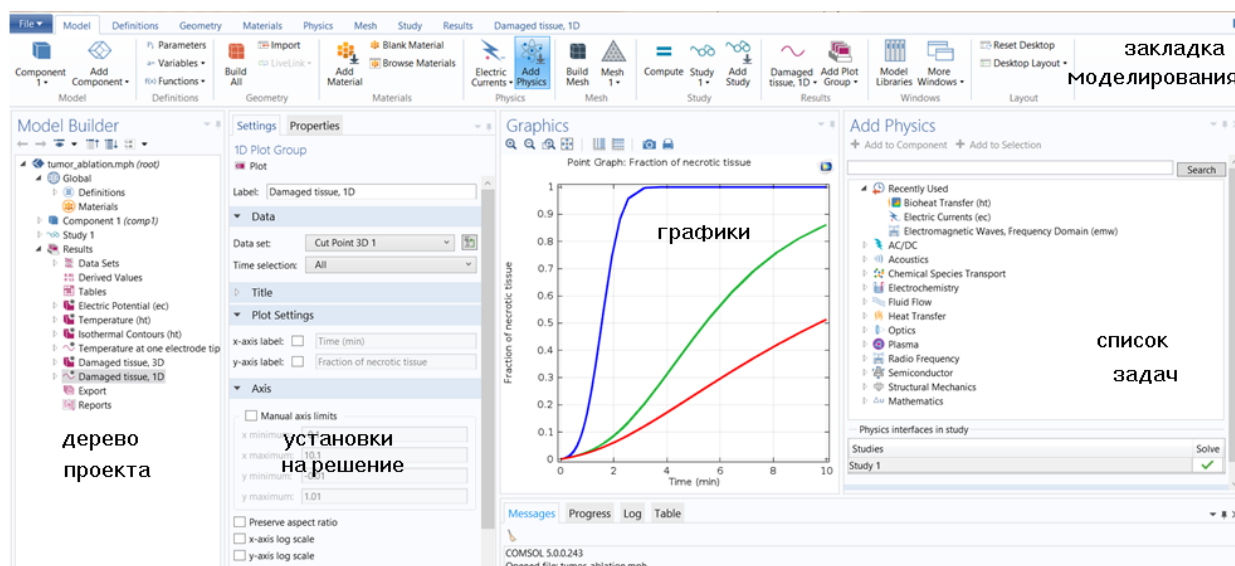


Рис. 24. Общий интерфейс программы COMSOL Multiphysics

В список задач доступных в COMSOL входят: задачи AC/DC, связанные с преобразование переменного тока в постоянный, **Acoustic** – акустические задачи, **Battery_and_Fuel** – моделирование источников питания, **SFD** – моделирование преобразователей энергии, модуль химических реакций, модуль коррозии, электрохимический модуль, Electrodeposition модуль, модуль усталости **Fatigue**, геомеханический

модуль, модуль теплопередачи, модуль **MEMS**, модуль гидродинамики и потоков **Microfluidics**, модуль смешанных данных **Mixel**, модуль молекулярных потоков **Molecular Flow**, многообъектный динамический модуль, модуль материалов с нелинейными структурами, модуль оптимизации, модуль расчета траекторий частиц, модуль потоков в трубах **Pipe Flow**, модуль плазмы.

Заключение

Обсуждение разных вопросов электродинамики важны для пользователей САПР, и связаны с проектированием приборов СВЧ на современном этапе развития науки и техники.

САПР СВЧ устройств прошел через несколько этапов: в 1960-х и 1970-х годов в первую очередь он базировался на формулах, связывающих электромагнитные поля; метод Олинера для коррекции, оценки точности расчета, учета неоднородностей и среды, в которой распространяется ЭМ поле. В 1980-х годах с методами и средствами проектирования начинают знакомиться и пользоваться лица, не являющиеся специалистами, и в 1990-х на рынке появились первые доступные коммерческие программы для решения СВЧ задач.

С 50-х годов 20 века САПР прошел:

- жесткое программирование в виде структуры арифмометра;
- использование носителей данных и алгоритмов на перфокартах, ввод данных в виде таблиц и цифр;
- описание физических явлений на основании формул и аналитических выражений;
- программируемые калькуляторы, решающие алгоритмы используя сменяемые подпрограммы;
- вывод результатов в виде таблиц и на экран монитора;

- вывод рисунков в виде таблиц и графиков;
- развитие систем параллельной работы со многими пользователями;
- интерактивный ввод данных с пульта.

В настоящее время развитие САПР переживает пору расцвета. Коммерческие программы стали важной частью на рабочем столе каждого СВЧ инженера и антенщика. Обучение современного инженера не мыслится без обучения инструментов проектирования, расчета, анализа и моделирования конкретных СВЧ устройств. Обучение пользователя часто опережает обучение теоретическим основам решения уравнений поля. Пользователь часто бросается решать любую задачу, но делает ошибки даже при создании трехмерной конструкции, с трудом устанавливает порты и источники возбуждения, и часто не может оценить верность полученных результатов. Выбор программного обеспечения: HFSS, FEKO, CST – для решения задачи часто решается случайно.

Наиболее часто в России используется программа CST MWS, это видимо произошло из-за наибольшей простоты освоения, а также автоматизации многих установок, например установок в CST граничных условий. Результаты расчета в CST можно видеть с самого начала временного процесса.

Развитие САПР СВЧ видится в следующем:

- Дальнейшее развитие методов ЭД моделирования (и в глубину, и для увеличения точности, и для гибридизации);
- Сенсорный ввод данных и коррекция структуры с экрана;
- Универсальный экспорт-импорт включая порты и возбуждения и параллелизация счета на многих компьютерах;
- Интеллектуальное формирование цели поиска, включая маски, развитие векторного синтеза;
- Звуковое оповещение об этапе решения задачи;

- Разработка рекомендаций для последующего действия;
- Новые методы поиска для исчерпывающего исследования многомерной поверхности целевой функции в системах поиска;
- Использование 3D принтеров, и замыкание цикла проектирования на одном рабочем месте.

Пользователи САПР с нетерпением ждут продолжения гигантского роста производительность компьютера. Оглядываясь на прошедшее десятилетие, когда в типичном ПК увеличилась тактовая частота от несколько десятков мегагерц до гигагерц, размеры памяти выросли от одного мегабайта до сотен мегабайт, а размеры диска увеличились с десяти или двадцати мегабайт до одного и более гигабайт (Рабочие станции также выросли значительно по мощности, хотя их преимущество над типичным ПК довольно слаба по сравнению с ситуацией десятилетней давности), можно ожидать и дальнейшего роста производительности расчетов.

Революция в мощности компьютеров произвела революцию в возможности программ электродинамического моделирования, используемых в промышленности. Это следствие этого то, что большинство СВЧ электромагнитных задач потенциально поддаются электродинамическому решению. Большая работа ожидается по гибридизации методов.

Тесно связаны с этими задачами являются методы расчета погрешностей в вычислениях. Важной ожидаемой целью проектирования является включение автоматических оптимизаторов с помощью итерационную процедуру расчета точными электродинамическими методами. Ряд коммерческих пакетов уже включает такие возможности.

Пользователь также вправе ожидать, что пользовательские интерфейсы будут продолжать совершенствоваться, делая моделирование сложных трехмерных устройств быстрее и легче. Кроме того, примечательно, что

некоторые коммерческие пакеты включают несколько методов расчета в одном пользовательском интерфейсе. Точку, которая была сделана часто в этой главе, и будет продолжаться часто в этой книге, заключается в том, что один стоит выбирать соответствующий метод под конкретную задачу; работа в единый пользовательский интерфейс, это будет намного проще для пользователей, чтобы использовать всю мощь электродинамических методов расчета.

Важной тенденцией САПР станет использование более мощных коммерческих пакетов и уменьшение числа (или по крайней мере использования) “бесплатных программ ЭД моделирования”.

Это отражает как сложность (и, следовательно, расходов) разработки пакетов общего назначения. Все программы должны быть надежными и включать предупреждения неверного действия пользователя и сообщения для пользователей, не имеющих глубокую подготовку в электромагнетизме.

Электродинамика СВЧ остается сложной дисциплины, и обучение пользователей основам электродинамики, а также сделать инструменты более надежные, будут становиться все более важно – хотелось бы надеяться, что эта книга будет способствовать решения этой задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Разевиг В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А.** Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office. М.: Солон-Пресс. 2003.
2. **С.Е. Банков, А.А. Курушин, В.Д. Разевиг.** Анализ и оптимизация трехмерных СВЧ структур с помощью HFSS // М.: Солон-Пресс. 2005.
3. **Нефедов Е.И.** Техническая электродинамика. М.: Издат. Центр «Академия». 2008.

4. **Сазонов Д.М.** Антенны и устройства СВЧ. М.: Высш. школа. 1988.
5. **Пименов Ю.В.** Линейная макроскопическая электродинамика. М.: Изд-во «Интеллект». 2008.
6. **Никольский В.В.** Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука. 1973.
7. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств. Под. ред. **Вольмана В.И.** М.: Радио и связь. 1982.
8. **Гуревич А.Г.** Ферриты на СВЧ. М.: Изд-во Физ. Мат. Лит. 1960.
9. **Нефедов Е.И., Сивов А.Н.** Электродинамика периодических структур. М.: Наука. 1980.
10. **Вайнштейн Л.А.** Электромагнитные волны. М.: Радио и связь. 1988.
11. **Harrington R.F.** Field computation by moment method. N-Y. Macmillan. 1968.
12. **Никольский В.В.** Вариационные методы для внутренних задач электродинамики. М. Наука. 1967.
13. **Левин Л.** Теория волноводов. М.: Радио и связь. 1981.
14. **Марков Г.Т., Чаплин А.Ф.** Возбуждение электромагнитных волн. М.: Радио и связь. 1983.
15. **Бодров В.В, Сурков В.И.** Математическое моделирование устройств СВЧ и антенн. М.: Изд-во МЭИ, 1994.
16. **Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф.** Специальные функции. М.: Наука. 1964.
17. **Вайнштейн Л.А.** Теория дифракции и метод факторизации. М.: Сов. Радио. 1966.
18. **Боровиков В.А., Кинбер Б.Е.** Геометрическая теория дифракции. М.: Связь. 1978.
19. **Уфимцев П.Я.** Метод краевых волн в физической теории дифракции. М.: Сов. Радио. 1962.
20. **Нефедов Е.И., Фялковский А.Т.** Полосковые линии передачи. М.: Наука, 1980.
21. **Duglas T. Ross.** "Computer-aided design". in: *Commun. ACM* 4(5), 1961, pp. 235.
22. <http://w2.eff.org/awards/pioneer/1994.php> EFF Pioneer
23. **Душин С.Е., Красов А.В., Литвинов Ю.В.** Моделирование систем и комплексов. С-Петербург, 2010.
24. Кремниевая компиляция, из прошлого в будущее (обзорная статья). «Открытые системы», № 02, 2009, <http://www.osp.ru/os/articles/>
25. **Норенков И.П.** Содержание и учебно-методическое обеспечение преподавания информатики и информационных технологий в МГТУ им. Н.Э.Баумана (Доклад на заседании Ученого совета МГТУ им. Н.Э.Баумана 28.06.04)
26. **Силаев М.А.** Обзор САПР (до 2002 года), на сайте ioso.ipso.distance

27. **Besser, L.** "Computer Aided Design of High Frequency Circuits" Electromechanical Design, August 1971.
28. **Besser, L.** "A Fast Computer Routine to Design High Frequency Circuits" IEEE ICC Conference, San Francisco, California, June 1970.
29. Hewlett Packard Test and Measurement Catalog -1991/ -P.646, 661.
30. Hewlett Packard Overview of Series IV. High-Frequency Design Software from HP-EEsof.. 1994. -35p.
31. **Pleasant D.** Simulation Technology for Components, Circuit and Systems // The HP EEsof High-Frequency Design Seminar Technical Papers. -1994. -P.3-33 .
32. Hewlett Packard HP 85180A High-Frequency Structure Simulator Release 2.0. Practical electromagnetic for analysis and visualization. -1992. - 8p.
33. Hewlett Packard HP 85180A. High-Frequency Structure Simulator Release 3.0 High-Frequency Design Software from HP Eesof. -1994. -2p.
34. **Kisling K.** Practical Applications of Electromagnific Tools // The HP- EEsof High-Frequency Design Seminar. Technical Papers, -1994. -P.61-84.
35. Hewlett Packard. New in Series ГY Version 6.0, -1995.
36. Solutions from HP EEsof. HP Advanced Design System. Release L0.-1998.-48p.
37. HP EEsof Design Technology. HP Advanced Design System. -1997.
38. Agilent Technologies Test and Measurement News. -Spring 2000, Issue 60.
39. Agilent Technologies Test and Measurement Catalog. -2000.-P. 548, 549.
40. <http://literature.agilent.com/.../pdf/relnotes.pdf>
41. SUPER-COMPACT. User's Manual, Compact Software Inc., Patterson N.Y.,.No 1 075046, Apr. 1987.
42. Microwave Harmonica PC. -Vol.4.1. Users Guide. -1991. (В двух томах).
43. Serenade PC for Windows.- Microwave J, -1994. Vol.37, № 3. -P.82,83.
44. **Курушин А., Разевиг В.** Современное программное обеспечение для проектирования электронных устройств СВЧ. САПР и графика, -1998. №7.- С.6-11.

45. **Курушин А.А., Петров А.С.** Проектирование СВЧ- устройств с помощью MMICAD. Методическое пособие. - Московский государственный институт электроники и математики. -М.: -1999. -182с.
46. Sonnet Tutorial/ Version 6,0.
47. **Потапов Ю.В.** СВЧ-моделирование с помощью программы CST Microwave Studio, Electronic Design Automation. EDA Express. -2000. №2. - С.12-14.
48. **Ребров А.С.** Обзор коммерческих программных комплексов автоматизированного проектирования твердотельной электроники СВЧ // Материалы конференции.- Севастополь, 11-15 сентября, 2000. -С. 145-147.
49. **Maas S.** Nonlinear Microwave Circuits. IEEE Press, N.Y., 1996.
50. **Никольский В.В.** и др. Система машинного проектирования устройств СВЧ - В.кн.: Машинные методы проектирования СВЧ-устройств. Под ред. А.С. Ильинского и В.В.Никольского. - М.: Изд. МГУ. -1967. -Т.1. -С.6-17.
51. **Сестрорецкий Б.В., Кустов В.Ю, Шлепнев Ю.О.** Универсальная электродинамическая программа для моделирования интегральных схем СВЧ с микрополосковыми и навесными элементами. - В кн.: Всесоюзная научная конференция "Интегральная электроника СВЧ" / Краткие тезисы докладов. - Красноярск, 1988-С.58.
52. **Сестрорецкий Б.В., Кустов В.Ю., Шлепнев Ю.О.** Методика анализа микрополосковых устройств на основе универсальной электродинамической программы. //ВРЭ. Сер. ОВР.-1990.-Вып.1.-С.3-12.
53. **Ланцов В.Н.** Теория и методы построения математического и программного обеспечения систем автоматизации проектирования нелинейных радиотехнических устройств: Диссертация доктора техн. наук. - М.: МАИ, 1991.
54. Пакет прикладных программ функционального проектирования гибридно-интегральных и монолитных схем СВЧ ANALIZ-PC // Киев: КПИ. Кафедра ТОЭ.
55. **Казанджан Н.Н., Сухоруков Н.В.** Комплекс программ автоматизированного проектирования микроволновых интегральных схем (ПРАММИС) для ПЭВМ класса IBM PC // Материалы конференции в 6 томах.-Т.4.-С.413-416.

56. МПП. Пакет программ сквозного цикла проектирования микрополосковых плат СВЧ // Реклама ЦИТ "Алмаз-42".
57. **Бахарев С.И., Сергеев А.А., Смирнов В.П.** Элементы и узлы объемных интегральных схем. - М.: ГОНТИ. -1990.-Ч. 1,2,3.
58. ВФ. Пакет программ автоматизации проектирования волноводных и волноводно-ферритовых СВЧ-устройств. // Рекл. ЦИТ "Алмаз-42".
59. **Батов П.Д., Дображанская О.Л., Калашник И.Е., Орлов В.П.** Пакет прикладных программ WF - инструмент инженера-разработчика волноводных и волноводно-ферритовых устройств СВЧ // Радиопромышленность.-1996. Вып.4. -С.58-67.
60. **Феоктистов В.Г.** Нахождение матрицы рассеяния устройств по матрицам рассеяния базовых элементов. Там же. -С.49-58.
61. **Батов П.Л.** Интегрированный программный комплекс Лямбда +. EDA Express. -2001. № 4. -С.24-28.
62. **Батов П.Л., Данилочкин Е.Н., Дображанская О.Л., Калашник И.Е., Орлов В.П., Пронина Г.А., Сергеев А.А., Феоктистов В.Г.** "Интегрированный программный комплекс. ЛЯМБДА + - корпоративная система математического моделирования и проектирования волноводных устройств и микрополосковых плат". / Информационные технологии в проектировании и производстве. -2002, №2.
63. Интегрированный программный комплекс моделирования и проектирования СВЧ-устройств ЛЯМБДА +. МРР. Система проектирования полосковых и микрополосковых устройств. / Руководство пользователя. -М, 2000.
64. **Данилочкина Е.Н., Пронина Г.А., Сергеев А.А.** Диалоговая программа подготовки запуска на расчет и просмотра результатов Формализованного Задания для системы МРР сквозного цикла проектирования полосковых устройств СВЧ на базе ПЭВМ. / Руководство пользователя. - М,2002.
65. **Бахарев С.И., Сергеев А.А.** Многослойные полосковые линии, переходы между ними, неоднородности / Радиопромышленность. Спецвыпуск НИИЭИР. -М. -2002. -134 с.
66. **Шлепнев Ю.О.** Применение метода прямых для математического моделирования планарных элементов интегральных схем СВЧ: Диссертация канд. техн. наук. -Новосибирск, НЭТИ. -1991.

67. **Шлепнев Ю.О., Сестрорецкий Б.В., Кустов В.Ю.** Новый подход к моделированию произвольных линий передачи. // Радиотехника и электроника-1997.-Т.42. № 1.- с. 18-22.
68. Автоматизированная система проектирования гибридных и монолитных интегральных схем СВЧ - диапазона на IBM PC / **Б.Ф. Безродный, К.В. Кулаков, В.М. Красноперкин** и др. // Материалы конференции. - Севастополь, 8-10 октября 1992. -С. 13 7-143.
69. Система автоматизированного проектирования СВЧ - устройств на ПЭВМ, совместимых с IBM PC.- В кн.: 2-я Крымская конф. "СВЧ - техника и спутниковый прием" / Материалы конференции -Севастополь, 8-10 октября 1992.
70. Реклама филиала "Комтех" ГНТЦ "Контракт" (1992).
71. ВИМИ. Информационный листок № 89-0474. Пакет прикладных программ по расчету характеристик устройств СВЧ на основе плоскопараллельных волноводов (ППП SDCHF). -М.: МАИ, 1989.
72. **Кузнецов Д.И., Нурмеев К.Н., Тюхтин М.Ф.** Пакет прикладных программ "Парус" - инструмент для схемотехнического и топологического проектирования ИС СВЧ // Материалы конференции. - Севастополь, 8-10 октября 1992. -С. 144-148.
73. Пакет прикладных программ "Спектр" для электродинамического моделирования элементов интегральных схем СВЧ. - Новосибирск: НЭТИ. Кафедра радиоприемных и радиопередающих устройств, 2000.
74. **Bogachkov I.V.** Microwave CAD System. MEMIA. / Программа конференции. -Новосибирск, September 18-20, 2001. -С.3.
75. Комплекс программ анализа СВЧ на ПЭВМ / **Я.К. Трохименко, В.В. Конин, А.И. Рыбин** и др. ИВУЗ // Радиоэлектроника.-1991.-Т.34, № 2.
76. **Мишустин Б.А** Автоматизированный анализ линейных радиоэлектронных устройств. - М.: МЭИ, 1995.
77. **Сазонов Д.М., Гридин А.Н., Мишустин Б.А,** Устройства СВЧ. - М.: Высшая Школа. 1981. -295с.
78. Комплекс программ общего назначения "Оператор-4" // Руководство пользователя ЕЭ. 00100-01.90 01.- Горький: ГНИЛИ, 1990.

79. **Зайцев А.Н., Кабанов Д.А., Сутягин В.В.** Система анализа микроволновых устройств. - В кн.: Международная конференция и школа молодых ученых и специалистов САПР-92. Новые информационные технологии в науке, образовании и бизнесе / Тезисы докладов. - Воронеж: ВПИ, - 1992.-С.41-42.
80. **Голенкевич Д.Ю.** Проектирование устройств СВЧ на персональной ЭВМ в подсистеме "Кактус". - В кн.: Автоматизированное проектирование в электронной и вычислительной технике./ Материалы семинара - Общество "Знание" РСФСР. - М.:МДНТП. 1990. -С.133-136.
81. **Аникин Г.Р., Карпуков Л.М., Романенко С.Н.** Системы автоматизированного проектирования СВЧ - устройств на микрополосковых и щелевых линиях // Всероссийская научно-техническая конференция "Разработка и применение САПР ВЧ И СВЧ электронной аппаратуры". Программа конференции Владимир, 1994. -С. 16.
82. **Ермоленко О.Н., Путилов П.П.** Интерактивная система автоматизированного проектирования пассивных микрополосковых устройств СВЧ // Всероссийск. науч.-техн.конф. "Разработка и применение САПР ВЧ и СВЧ электронной аппаратуры". Программа конференции. - Владимир, 1994.-с.16
83. **Садовский Н.В.** Комплекс программ моделирования полосковых линий методом статистических испытаний RSL-COMPLEX-2 // Труды Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. -Владимир. -1990. - с.91.
84. Пакет прикладных программ для моделирования и проектирования частотно- селективных систем СВЧ и КВЧ диапазонов / **А.А. Кириленко, Л.А. Рудь, С.Л. Сенкевич** и др. // Материалы конференции в 6 томах. - Севастополь, 20-23 сентября 1993. - Т.6. -С.740-74.
85. **Лерер А.М., Лерер В.М., Следков В.А.** Программы для расчета интегральных линий передачи с периодическими и одиночными неоднородностями // Программа конференции. -Севастополь, 26-29 сентября 1994.-С.39.
86. **Давыдов А. Г., Захаров Е. В., Пименов Ю. В.** Метод численного решения задач дифракции электромагнитных волн на незамкнутых поверхностях произвольной формы. Доклады АН СССР, т.276, в.1, 1984.

87. **Курушин А.А., Лаврецкий Е.И., Чадов С.Е.** Расчёт зеркальных параболических антенн с помощью современных САПР СВЧ. Современная электроника, 2014, № 3, стр. 64-70.
88. **Rizzoli V., Lipparini A., Constanzo A.** et al. State of the art harmonic-balance simulation of forced nonlinear microwave circuits by the piecewise technique: IEEE Trans. -1992. -Т. MTT-40, N1. -Р. 12-27.
89. Метод нелинейного спектрального анализа и его применения при моделировании СВЧ устройств / **Б.Н. Шелковников, А.В. Микрюков. Г.В. Сердюк** и др. // 4-я Крымская конференция "СВЧ- техника и спутниковый прием" // Программа конференции. —Севастополь, 26-29 сентября 1994. - С.297-300.
90. Mathematics and software for microwave circuit design. **B.N. Shelkovnikov, K.S. Sunduchkov, G.V. Serdyuk, A.A. Mikryukov, O.V. Kolchanov** // Proc. of the International Symp. on Signal, System and Electronics (ISSS'92).-Paris. 1992.
91. Новые версии программных средства для проектирования СВЧ-систем и устройств/**Б.Н. Шелковников, М.Е. Ильченко: Г.А. Головки, Д.Г. Головки, О.В. Колчанов** // Материалы 5-й Крымской конференции "СВЧ техника и спутниковые телекоммуникационные технологии". Севастополь. - 1995. -Т.1. -С. 201-204.
92. Система моделирования и проектирования устройств СВЧ в нелинейных режимах / **Б.Н. Шелковников, М.Е. Ильченко, О.В. Колчанов, С.Н. Таванец, А.Б. Шелковников** // Материалы 7-й Международной Крымской Микроволновой конференции. -Севастополь. -1997. -С.219-221.
93. Система моделирования и проектирования устройств СВЧ в нелинейных режимах / **Б.Н. Шелковников, М.Е. Ильченко, О.В. Колчанов, С.Н. Таванец, А.Б. Шелковников** // Материалы 7-й Международной Крымской Микроволновой конференции. - Севастополь. -1997. -С.219-221.
94. Пакет прикладных программ функционального проектирования гибридно-интегральных и монолитных схем СВЧ ANALIZ-PC // Реклама. - Киев: КПИ. Кафедра ТОЭ.
95. **Казанджан Н.Н., Сухоруков Н.В.** Комплекс программ автоматизированного проектирования микроволновых интегральных схем (ПРАММИС) для ПЭВМ класса IBM PC // Материалы конференции в 6 томах.-Т.4.-С.413-416.

96. САПР ВЧ и СВЧ электронных устройств / **В.Н. Ланцов, И.Е. Жигалов, А.С. Меркутов** и др. // Труды Всероссийской научно-технической конференции с международным участием.- Владимир.-1994.-С.98-101.
97. АНРУС. САПР аналоговых нелинейных радиоэлектронных устройств ВЧ- и СВЧ-диапазона// Реклама. - Владимир: ГТУ, 1994.-4с.
98. **Радченко В.В.** Анализ и оптимизация характеристик активных и пассивных микрополосковых СВЧ-устройств на персональных ЭВМ // Электронная техника. -Сер.1. -Электроника СВЧ. -1995. -Вып.2. -С.45-53.
99. **Радченко В.В.** САПР активных и нелинейных микрополосковых СВЧ-устройств / 5-ая Международная НТК. Математическое моделирование и САПР систем сверхбыстрой обработки информации на объемных интегральных схемах (ОИС) СВЧ и КВЧ. Тезисы докладов - Сергиев Посад.-1995.-С.131.
100. **Gridin V.N.** Complex integrated radioelectronics CAD. System: system and application support. Та же НТК. Пригласительный билет и программа.-1995.-С. 19.
101. **Гринберг Г.С., Могилевская Л.Я., Хотунцев Ю.Л.** Численное моделирование нелинейных устройств на полевых транзисторах с барьером Шотки. Электронная техника. -Сер.1; СВЧ-техника. -1993. Вып.4. (458).-С. 18-22.
102. **Галкин В.А., Романюк В.А.** Алгоритм анализа нелинейных СВЧ схем с использованием интеграла Дюамеля // Электронная техника. Сер. 10.-1981. Вып.3 (27), с.24-27.
103. **Галкин В.А.** Разработка и применение алгоритма анализа нелинейных СВЧ-схем, основанного на сочетании частотных и временных методов расчета. Диссертация канд.техн.наук. -Зеленоград: МИЭТ,1982.
104. Программные средства проектирования радиотехнических систем // Реклама.- Рязань, РТИ Кафедра радиотехнических систем. 1993.
105. **Текшев В.Б., Разевиг В.Д., Плигин С.Г.** Автоматизированное проектирование микроминиатюрных полупроводниковых узлов СВЧ радиоприемных устройств.- М.: МЭИ, 1987.-100с.
106. **Разевиг В.Д.** Применение программ P-CAD и P-Spice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. М.: Радио и связь, 1992.- вып.4.-72с.

107. **Брянский Л.Н.** Использование систем автоматизированного проектирования в метрологических институтах. // Измерительная техника. - М.-1985, №5.-С.20-22.
108. **Горбунов П.В., Поздняков Д.Д.** Пакет программ и оболочка для автоматизированного проектирования контрольно-измерительных систем // Труды Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. - Владимир. -1994. -С.62,63.
109. **Надеждин Б.Б.**, ППП "Топаз"- программный интерфейс между САПР: ПРАМ-0,3" на ЕС ЭВМ и САПР "Auto CAD" на ПЭВМ IBM PC // Труды Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. - Владимир. -1994. -С.114-117.
110. **J.Jin** . The Finite Element Method in Electromagnetics. New York: Wiley, 2nd edn., 2002;
111. **W. C. Chew, J. M. Jin, E. Michielssen, and J. M. Song**, Eds., Fast and Efficient Algorithms in Computational Electromagnetics. Norwood, MA: Artech House, 2001.
112. **P. P. Silvester and R. L. Ferrari**, Finite Elements for Electrical Engineers, 3rd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1996.
113. **J. L. Volakis, A. Chatterjee, and L. C. Kempel**, Finite Element Method for Electromagnetics: Antennas, Microwave Circuits and Scattering Applications. New York: IEEE Press, 1998.
114. **A. F. Peterson, S. L. Ray, and R. Mittra**, Computational Methods for Electromagnetics. New York: IEEE Press, 1998.
115. **David B. Davidson**. Computational Electromagnetics for RF and Microwave Engineering. Cambridge University Press 2005
116. **P. P. Silvester**, "Finite element solution of homogeneous waveguide problems," *Alta Freq.*, vol. 38, pp. 313–317, May 1969.
117. **K. K. Mei**, "Unimoment method of solving antenna and scattering problems," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 22, pp. 760–766, Nov. 1974.
118. **S. P. Marin**, "Computing scattering amplitudes for arbitrary cylinders under incident plane waves," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 30, pp. 1045–1049, Nov. 1982.
119. **P. P. Silvester and M. S. Hsieh**, "Finite-element solution of 2-dimensional exterior field problems," *IEE Proc. H*, vol. 118, pp. 1743–1747, Dec. 1971.
120. **B. H. McDonald and A. Wexler**, "Finite-element solution of unbounded field problems," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 20, pp. 841–847, Dec. 1972.

121. **J. C. Nedelec**, “Mixed finite elements in R³,” *Numer. Math.*, vol. 35, pp. 315–341, 1980.
122. **A. Bossavit and J. C. Verite**, “A mixed FEM–BIEM method to solve 3-D eddy current problems,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 18, pp. 431–435, Mar. 1982.
123. **M. L. Barton and Z. J. Cendes**, “Newvector finite elements for three-dimensional magnetic field computation,” *J. Appl. Phys.*, vol. 61, pp. 3919–3921, Apr. 1987.
124. **T. Orikasa, S. Washisu, T. Honma, and I. Fukai**, “Finite element method for unbounded field problems and application to two-dimensional taper,” *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 19, pp. 157–168, 1983.
125. **J. D’Angelo, M. J. Povinelli, and M. A. Palmo**, “Hybrid finite element/boundary element analysis of a strip line notch array,” *IEEE AP-S Int. Symp. Dig.*, vol. 3, pp. 1126–1129, 1988.
126. **J. D’Angelo and I. D. Mayergoyz**, “Finite element methods for the solution of RF radiation and scattering problems,” *Electromagnetics*, vol. 10, pp. 177–199, 1990.
127. **H. Ali and G. Costache**, “Finite-element time-domain analysis of axisymmetrical radiators,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 42, no. 2, pp. 272–275, Feb. 1994.
128. **J. M. Jin and J. L. Volakis**, “A hybrid finite element method for scattering and radiation by microstrip patch antennas and arrays residing in a cavity,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 39, pp. 1598–1604, Nov. 1991.
129. **A. D. Greenwood and J. M. Jin**, “A field picture of wave propagation in inhomogeneous dielectric lenses,” *IEEE Antennas Propagat. Mag.*, vol. 41, no. 5, pp. 9–18, Oct. 1999.
130. **C. S. Liang, D. A. Streater, J. M. Jin, E. Dunn, and T. Rozendal**, “A quantitative study of Luneberg lens reflectors,” *IEEE Antennas Propagat. Mag.*, vol. 47, no. 2, pp. 30–42, Apr. 2005.
131. **R. K. Gordon and R. Mittra**, “Finite element analysis of axisymmetric radomes,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 41, no. 7, pp. 975–981, July 1993.
132. **E. Dunn, J. K. Byun, E. Branch, and J. M. Jin**, “Numerical simulation of BOR scattering and radiation using a higher-order FEM,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 54, no. 3, pp. 945–952, Mar. 2006.
133. **T. Özdemir, M. W. Nurnberger, J. L. Volakis, R. Kipp, and J. Berrie**, “A hybridization of finite-element and high-frequency methods for pattern prediction for antennas on aircraft structures,” *IEEE Antennas Propagat. Mag.*, vol. 38, pp. 28–37, June 1996.

134. **A. Barka and P. Caudrillier**, “Domain decomposition method based on generalized scattering matrix for installed performance of antennas on aircraft,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 55, no. 6, pp. 1833–1842, June 2007.
135. **D. Jiao and J. M. Jin**, “Fast frequency-sweep analysis of cavity-backed microstrip patch antennas,” *Microwave Opt. Tech. Lett.*, vol. 22, no. 6, pp. 389–393, Sept. 1999.
136. **D. Jiao and J. M. Jin**, “Time-domain finite element simulation of cavity-backed microstrip patch antennas,” *Microwave Opt. Tech. Lett.*, vol. 32, no. 4, pp. 251–254, Feb. 2002.
137. **F. Edelvik, G. Ledfelt, P. Lotstedt, and D. J. Riley**, “An unconditionally stable subcell model for arbitrarily oriented thin wires in the FETD method,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 51, no. 8, pp. 1797–1805, Aug. 2003.
138. **Z. Lou and J. M. Jin**, “Modeling and simulation of broadband antennas using the time-domain finite element method,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 53, no. 12, pp. 4099–4110, Dec. 2005.
139. **Z. Lou and J. M. Jin**, “A novel dual-field time-domain finite-element domaindecomposition method for computational electromagnetics,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 54, no. 6, pp. 1850–1862, June 2006.
140. **L. E. R. Petersson and J. M. Jin**, “A three-dimensional time-domain finite element formulation for periodic structures,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 54, no. 1, pp. 12–19, Jan. 2006.
141. **R. Wang, H. Wu, A. C. Cangellaris, and J.-M. Jin**, “Time-domain finite-element modeling of antenna arrays with distributed feed network,” *IEEE AP-S Int. Symp. Dig.*, p. 132.1, San Diego, CA, July 2008.
142. **A. E. Yilmaz, Z. Lou, E. Michielssen, and J. M. Jin**, “A single-boundary, implicit, and FFTaccelerated time-domain finite element–boundary integral solver,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 55, no. 5, pp. 1382–1397, May 2007.
143. www.comsol.ru – сайт официального дистрибьютера в России программы COMSOL (Москва, Б.Садовая, 10)
144. **А.А.Курушин**. Расчет теплового поля в биологических объектах вод воздействием СВЧ излучения. М., 2015, 412 стр.

Об авторах

Об авторах:

Банков Сергей Евгеньевич – д.т.н., гл. научн. сотр. ИРЭ РАН. Окончил РТФ Московского энергетического института в 1981 г, аспирантуру в 1986 г. Специалист в области СВЧ техники и антенн, эксперт в области САПР СВЧ. Автор нескольких монографий, учебных пособий, 180 научных статей и 30 патентов.

Курушин Александр Александрович – к.т.н., доцент каф. АУиРРВ МЭИ. Окончил РТФ МЭИ в 1979 г, аспирантуру в 1985 г. К.т.н. (1991 г.), диссертация «Проектирование транзисторных СВЧ усилителей с расширенным динамическим диапазоном». С 1996 г. преподавал различные аспекты СВЧ в МИЭМ, МИРЭА и МЭИ. Автор нескольких учебных пособий в области проектирования СВЧ устройств и 120 научных статей.