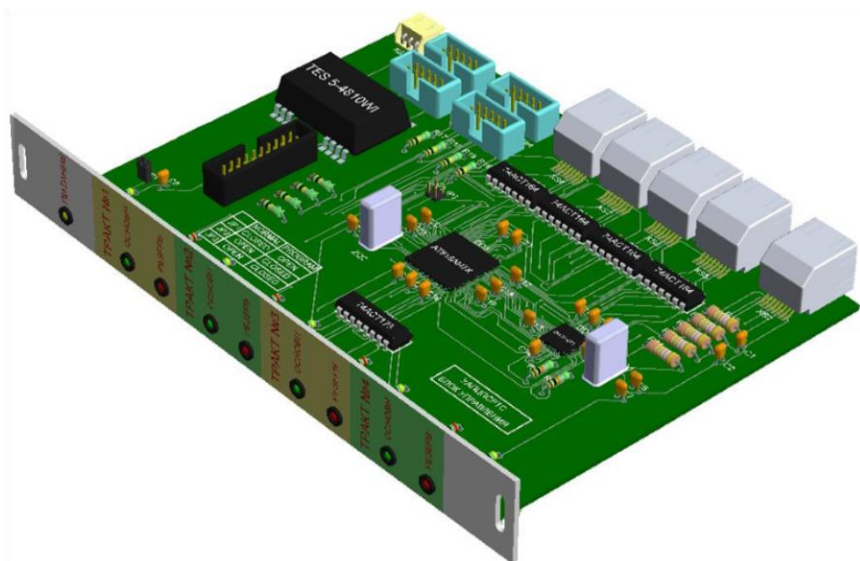




Кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры

Основы компьютерных технологий проектирования радиоэлектронных средств



Томск 2018

Кобрин Ю.П.

Основы компьютерных технологий проектирования радиоэлектронных средств. Учебное пособие по дисциплине «Автоматизированное проектирование РЭС» для студентов специальности «11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств». - Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), кафедра КИПР, 2018. – 56 с.

Чтобы сокращение срока обучения на один год (по сравнению со специалистом) в меньшей мере сказывалось на уровне и качестве подготовке выпускника профиля «Проектирование и технология радиоэлектронных средств», способного компетентно решать весь комплекс проблем разработки систем, схем, конструкций и технологий в сфере электронного приборостроения, необходимы учебные пособия, в сжатом виде, но в то же время достаточно полно отражающие эти проблемы.

Рассмотрены терминология и наиболее существенные принципы сквозного автоматизированного проектирования радиоэлектронных средств на разных этапах, важнейшие принципы применения системного подхода к проектированию РЭС, характеристики наиболее известных систем автоматизированного проектирования (САПР) РЭС.

Предназначено для подготовки бакалавров и магистрантов в области разработки и исследования РЭС различного назначения, выполнения курсовых и дипломных проектов, но может быть использовано и студентами других специальностей радиотехнического профиля.

© Кобрин Ю.П. 2018

© Кафедра КИПР федерального Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 2018.

СОДЕРЖАНИЕ

1 Цели работы.....	3
2 Порядок выполнения работы	3
3 Содержание отчёта	3
4 Контрольные вопросы	3
5 Компьютерные технологии проектирования РЭС	5
5.1 Терминология, используемая при ИТ-проектировании РЭС	5
5.2 Информационные технологии	14
5.3 Стадии и этапы жизненного цикла РЭС.....	21
5.4 Системный подход к проектированию РЭС	25
6 Системы автоматизированного проектирования	30
6.1 Конструкторские (САМ) САПР.....	31
6.1.1 «Solid Works» – система инженерного трёхмерного моделирования	31
6.1.2 «Компас» — отечественная 3D САПР, позволяющая оформлять конструкторскую документацию по стандартам ЕСКД	35
6.1.3 Система трёхмерного твердотельного и поверхностного параметрического проектирования <i>Autodesk Inventor</i>	36
6.1.4 САПР высокого уровня CATIA	37
6.2 САПР проектирования печатных плат	38
6.2.1 САПР P-CAD	38
6.2.2 САПР семейства <i>Altium Designer</i>	39
6.2.3 САПР <i>Mentor Graphics</i>	41
6.2.4 САПР печатных плат DipTrace	42
6.2.5 САПР PADS <i>PowerPCB</i>	44
6.2.6 САПР электронных устройств <i>Delta Design</i>	44
6.2.7 САПР OrCAD/Allegro	46
6.3 САПР моделирования режимов работы РЭС.....	47
6.3.1 «АСОНИКА» - автоматизированная система обеспечения надёжности и качества РЭС.....	47
6.3.2 «ANSYS» - универсальная система конечно-элементного анализа	49
6.3.3 «NI AWR Design Environment» - система проектирования высокочастотных (ВЧ) и сверхвысокочастотных (СВЧ) РЭС.....	50
7 Список литературы.....	52

1 Цели работы

- 1) Освоение терминологии информационных технологий проектирования радиоэлектронных средств.
- 2) Ознакомление с основными стадиями и этапами жизненного цикла РЭС.
- 3) Рассмотрение важнейших принципов применения системного подхода к проектированию РЭС.
- 4) Изучение возможностей наиболее известных систем автоматизированного проектирования (САПР) РЭС.

2 Порядок выполнения работы

- 1) Изучить теоретический материал (разделы 5 и 6).
- 2) Ответить на контрольные вопросы.
- 3) Предложить не менее 3-х вариантов организации сквозного проектирования РЭС различного уровня сложности.
- 4) Оформить и защитить отчёт о выполненной работе.

3 Содержание отчёта

Для получения зачёта по работе студент должен:

- 1) Знать назначение и основные возможности рассматриваемых САПР.
- 2) Уметь пользоваться терминологией, употребляемой при компьютерном проектировании РЭС.
- 3) Представить результаты выполнения работы в отчёте, содержащем:
 - Цель работы.
 - Ответы на контрольные вопросы.
 - Варианты комплексирования САПР для организации сквозного проектирования РЭС различного уровня сложности.
 - Выводы.

4 Контрольные вопросы

- 1) Дайте определение понятия «информационные технологии проектирования РЭС».
- 2) Дайте определение понятия «проектирование».
- 3) Почему проектирование обычно имеет итерационный характер?
- 4) Что представляет из себя типовой итерационный маршрут выполнения любого этапа проектирования РЭС?
- 5) Дайте характеристику этапов жизненного цикла РЭС.
- 6) Какие причины привели к появлению и развитию CALS-технологий?
- 7) Назовите признаки, присущие сложной системе.
- 8) Приведите примеры иерархической структуры РЭС, их внутренних, внешних и выходных параметров.

- 9) В чем сущность блочно-иерархического подхода к проектированию?
- 10) Какие этапы автоматизированного проектирования РЭС Вы знаете?
- 11) Дайте определение САПР. Что является целью функционирования САПР?
- 12) Каковы важнейшие черты современных САПР?
- 13) Что называется, интегрированной (сквозной) САПР?
- 14) Что включает полный комплект документации при неавтоматизированном проектировании?
- 15) Что включает полный комплект документации при автоматизированном проектировании?
- 16) В чём состоит сущность функционального подхода к проектированию?
- 17) Какими особенностями характерен оптимальный подход к проектированию?
- 18) Какими общими свойствами сложных технических систем обладают РЭС? На каких принципах основан системный подход к проектированию?
- 19) На какие цели ориентированы задачи анализа и синтеза при проектировании РЭС?
- 20) Какие специфические особенности выделяют РЭС в классе технических объектов с точки зрения выполнения проектных работ?
- 21) Что представляют собой функциональное, конструкторское, технологическое и информационное описания РЭС?
- 22) Какие стадии порядка разработки и постановки на производство продукции устанавливают государственные стандарты РФ?
- 23) В чём заключается сущность модульного принципа проектирования?
- 24) Какие уровни разукрупнения (модульности) РЭС определяет ГОСТ Р 52003-2003?
- 25) Какие основные комплексы государственных стандартов определяют состав и требования к технической документации?
- 26) Какие виды и типы схем принято выделять?
- 27) Каково назначение и основные правила заполнения перечня элементов?
- 28) Что представляет собой электронный конструкторский документ (ЭКД), и какие виды ЭКД Вам известны?

5 Компьютерные технологии проектирования РЭС

5.1 Терминология, используемая при ИТ-проектировании РЭС

Информационные технологии (ИТ, от англ. *information technology, IT*) — это комплекс взаимосвязанных научных, технологических, инженерных дисциплин, изучающих методы эффективной организации труда людей, занятых обработкой и хранением информации, вычислительную технику и методы организации и взаимодействия с людьми и производственным оборудованием, их практические приложения, а также связанные со всем этим социальные, экономические и культурные проблемы.

Радиоэлектронные средства (РЭС) — изделия и/или их составные части, в основу функционирования которых положены принципы радиотехники и электроники. РЭС предназначены для передачи, преобразования и (или) приёма электромагнитных сигналов в диапазоне частот колебаний от низких частот (НЧ) до сверхвысоких частот (СВЧ), состоящие из одного или нескольких передающих, преобразующих и (или) приёмных устройств либо комбинации таких устройств и включающие в себя вспомогательное оборудование.

Проектирование РЭС (лат. *projectus* - брошенный вперёд) - это поиск научно-обоснованных, технически осуществимых и экономически целесообразных инженерных решений. Результатом проектирования является проект будущего изделия - целостная совокупность моделей, свойств или характеристик, описанных в форме, пригодной для его реализации. Проект анализируется, обсуждается, корректируется и принимается как основа для дальнейшей разработки. Наравне с расчётными этапами и экспериментальными исследованиями, внутри процесса проектирования выделяют *процессы конструирования и технологии*, которые не могут выполняться в отдельности, без учёта взаимосвязей между собой и с другими этапами разработки.

Конструирование (англ. *design* - замысел, конструкция, вымысел) - процесс выбора структуры пространственных и энергетических взаимосвязей элементов и связей с окружающей средой и объектами, выбора материалов этих элементов и связей, обработки и установления на них таких норм, пользуясь которыми можно изготовить изделие, отвечающее заданным требованиям. Конструирование опирается на результаты проектирования и уточняет все инженерные решения, принятые при проектировании.

Конструирование РЭС – творческий процесс создания новых конструкций радиоэлектронных средств, конечным результатом которого является комплект рабочих конструкторских документов для технологической подготовки производства, изготовление РЭС, его испытания и эксплуатации.

Конструкторская документация (КД) — графические и текстовые документы, которые в совокупности или в отдельности определяют состав и устройство изделия и содержат необходимые данные для его разработки, изготовления, контроля, эксплуатации, ремонта и утилизации.

Конструкция РЭС (лат. *constructio* - составление, построение) - совокупность элементов и деталей с различными физическими свойствами и формами, находящихся в определённой пространственной, механической, электрической, электромагнитной и тепловой

взаимосвязи. Связи определяются электрическими схемами и конструкторской документацией и обеспечивают необходимую надёжность, точность, стабильность функционирования РЭС в заданных условиях эксплуатации, а также возможность производства при заданных экономических требованиях в необходимом количестве изделий (Рис. 5.1).

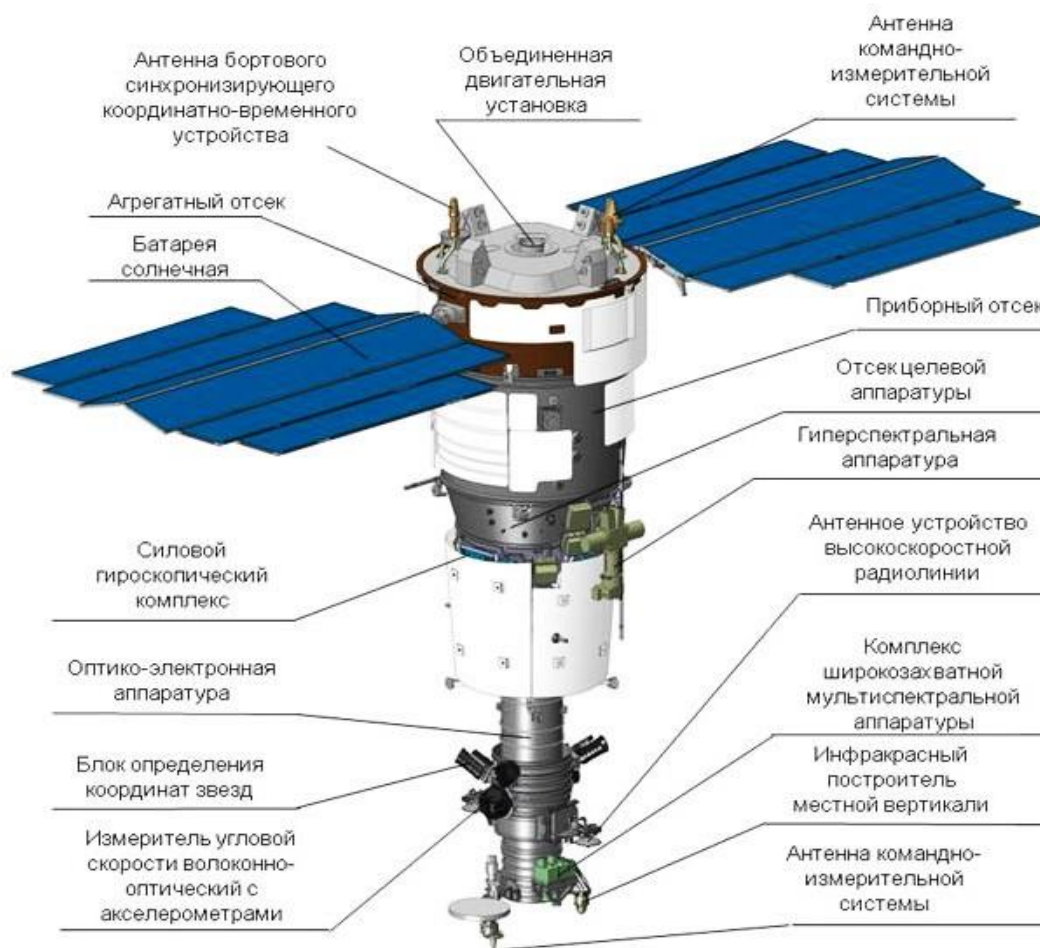


Рис. 5.1 – Радиоэлектронные подсистемы спутника дистанционного зондирования Земли

Технология (греч, *techné* - искусство - мастерство, умение + логия, т.е. учение) - система взаимосвязанных организационных мер, методов, приёмов и процессов обработки материалов с целью изготовления, обслуживания, ремонта и/или эксплуатации некоторого изделия с заданным качеством и оптимальными затратами. Это часть производственного процесса - определённых действий, направленных на изменение свойств объекта производства в соответствии с технологической документацией и достижение им состояния, соответствующего технической (конструкторской) документации.

Целью конструирования РЭС является определение его формы и способа соединения составных частей, используемых материалов, покрытий и др., в ходе которого создаётся комплект проектных и рабочих *конструкторских документов* (КД) («ГОСТ 2.101-2016 ЕСКД. Виды изделий» и «ГОСТ 2.109-73 ЕСКД. Основные требования к чертежам»), на основе которых впоследствии осуществляется *технологическая подготовка производства*, разработка *технологической документации* (ТД), изготовление РЭС, его испытания и эксплуатация.

Жизненный цикл РЭС (ЖЦ) - это совокупность процессов, выполняемых от момента выявления потребностей общества в определённом изделии до момента удовлетворения этих потребностей и его утилизации.

Стадии проектирования (англ. *the design stage*) - наиболее крупные законченные части процесса разработки конструкторской документации, состоящие из этапов выполнения работ и характеризующаяся достижением заданного результата (ГОСТ 2.103-2013 ЕСКД. Стадии разработки).

Электрорадиоэлементы (ЭРЭ) - резисторы, конденсаторы, транзисторы, микросхемы, разъёмы и т.п., образующие радиоэлектронные средства различной сложности (приборы, блоки, узлы и т.д.).

Несущая конструкция РЭС (англ. *bearing design*) предназначена для размещения, компоновки и коммутации ЭРЭ и других составных частей изделия в целях обеспечения его устойчивого функционирования и защиты от воздействия неблагоприятных факторов условий эксплуатации.

Компоновка (лат. *componere* - складывать, строить, сочинять) - расположение, структуризация отдельных частей в проектируемом объекте.

Качество (англ. *quality*) – совокупность качественных и количественных характеристик (физических, функциональных, эргономических и др.), присущих данному объекту, относящихся к его способности удовлетворять установленные и предполагаемые в нём потребности. Качество РЭС оценивается таких характеристик как целевое назначение, надёжность, безопасность и др.

Технологичность (англ. *manufacturability*) – совокупность свойств конструкции изделия, проявляемых в возможности оптимальных затрат труда, средств, материалов и времени при технологической подготовке производства, изготовлении, эксплуатации и ремонте по сравнению с соответствующими показателями однотипных конструкций изделий того же назначения, при обеспечении установленных значений показателей качества и принятых условиях изготовления, эксплуатации и ремонта.

Конструктивная и технологическая преемственность - наделение нового изделия, такой совокупностью свойств, которые определяют возможность применения в нем составных частей (деталей, узлов, агрегатов и т.д.) и технологических процессов, показавших высокие качества в ранее разработанных изделиях.

Типизация (англ. *typing*) - сведение всего вероятного многообразия конструктивных технологических, организационных и т.п. решений к небольшому числу типовых.

Унификация (лат. *unito* - единство, *facere* - делать) - использование одних и тех же конструкций для создания аппаратуры различного назначения, т. е. расширение области использования типовых решений. Позволяет уменьшить число типов, видов и размеров изделий, комплектующих, деталей, марок материалов и т.п.

Стандартизация (англ. *standardization*) – деятельность по установлению правил и характеристик в целях их добровольного многократного использования, направленная на достижение упорядоченности в сферах производства и обращения продукции и повышение

конкурентоспособности продукции, работ или услуг [1]. Позволяет избежать необоснованного многообразия в материалах, оборудовании, технологических процессах и резко сократить продолжительность цикла создания и освоения новых РЭС.

Межгосударственный стандарт (ГОСТ) — региональный стандарт, принятый Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации Содружества независимых государств в 1992 г. На территории Евразийского экономического союза межгосударственные стандарты применяются добровольно. До этого года аббревиатура ГОСТ характеризовала государственные стандарты СССР.

Государственные стандарты РФ (ГОСТ Р) – национальные стандарты, принятые органом по стандартизации России (Госстандарт РФ) для применения только на территории РФ.

Разработаны множество комплексов отечественных нормативно-технических документов, среди которых:

- единая система конструкторской документации (ГОСТ 2.001—2013. ЕСКД. Общие положения) [2], устанавливающая взаимосвязанные правила, требования и нормы по разработке, оформлению и обращению конструкторской документации, разрабатываемой и применяемой на всех стадиях жизненного цикла изделия (при проектировании, разработке, изготовлении, контроле, приёмке, эксплуатации, ремонте, утилизации);

- единая система технологической документации (ГОСТ 3.1001-81. ЕСТД. Общие положения) [3], устанавливающая взаимосвязанные правила и положения по порядку разработки, комплектации, оформлению и обращению технологической документации, применяемой при изготовлении и ремонте изделий;

- единая система программной документации (ГОСТ 19.001-77. ЕСПД. Общие положения) [4], устанавливающая взаимосвязанные правила разработки, оформления и обращения программ и программной документации;

- единая система технологической подготовки производства (ЕСТПП) [5], устанавливающая взаимосвязанные правила и положения по порядку организации и управления технологической подготовкой производства (ТПП) и др.

Международные стандарты ИСО (международная организация по стандартизации, англ. *International Organization for Standardization, ISO*), **МЭК** (международная электротехническая комиссия, англ. *International Electrotechnical Commission, IEC*), **ИСО/МЭК**, например, ГОСТ ИСО - стандарты, принятые соответствующими странами членами и членами - корреспондентами международных организаций по стандартизации ИСО. Хотя стандарты ИСО не считаются обязательными документами, в РФ применяются более половины из них.

Отраслевые (региональные) стандарты (ОСТ) – стандарты, принятые государственным органом управления в пределах его компетенции применительно к продукции, работам и услугам отраслевого (регионального) назначения.

Стандарт предприятия, СТП - стандарт, принятый предприятием применительно к продукции, работам и услугам своего предприятия. Например, общие требования и правила выполнения всевозможных студенческих работ по направлениям подготовки и специальностям технического профиля в Томском университете систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) регламентированы ОС ТУСУР 01-2013 [6].

Печатная плата (ПП, англ. *Printed Circuit Board, PCB*, или *Printed Wiring Board, PWB*) — пластина из диэлектрика, на поверхности и/или в объеме которой сформированы электропроводящие цепи (печатные проводники) электрической схемы (Рис. 5.2). Печатная плата предназначена для электрического и механического соединения различных электронных компонентов. Электронные компоненты на печатной плате обычно соединяются своими выводами с элементами проводящего рисунка пайкой.

Gerber — файловый формат, разработанный корпорацией *Gerber Systems*, представляющий собой способ описания проекта печатной платы для изготовления фотошаблонов на самом разнообразном оборудовании (Рис. 5.3).

Gerber-файл - текстовое описание последовательности команд, обеспечивающих прорисовку различных элементов топологии (контактных площадок, переходных отверстий, линий, дуг, текстовых надписей) с помощью плоттера. Gerber-файлы используются также для обработки контуров плат, создания трафаретов для паяльной пасты и файлов сверления ПП.

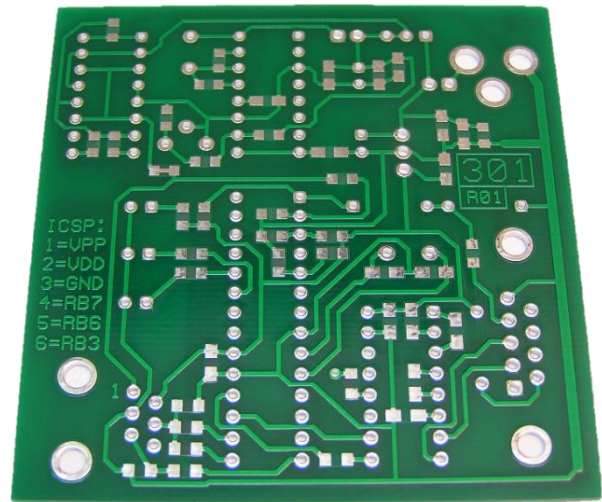


Рис. 5.2 - Печатная плата

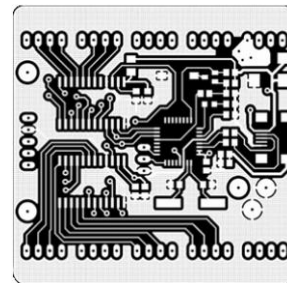


Рис. 5.3 - Фотошаблон ПП и фотоплоттер FP-3000 для печати фотошаблонов

Печатный узел (англ. *Printed Board Assembly, PBA*) - печатная плата с подсоединёнными к ней в соответствии с чертежом электрическими и механическими элементами и (или) другими печатными платами (Рис. 5.4).

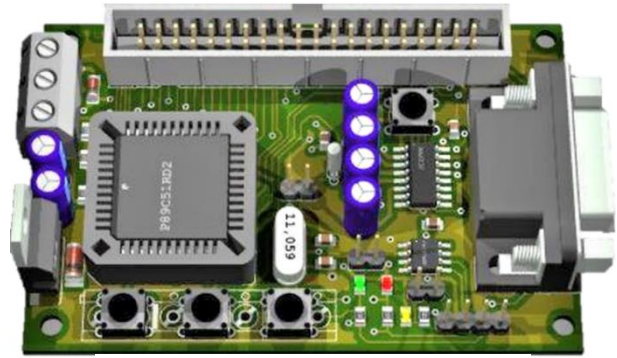


Рис. 5.4 - Печатный узел

Микросборка (МСБ) – (Рис. 5.5) микроэлектронное изделие, выполняющее определённую функцию и состоящее из элементов, компонентов и (или) микросхем (ИС) и других радиоэлементов в различных сочетаниях, разрабатываемое и изготовляемое разработчиками конкретных РЭС для улучшения показателей их миниатюризации.

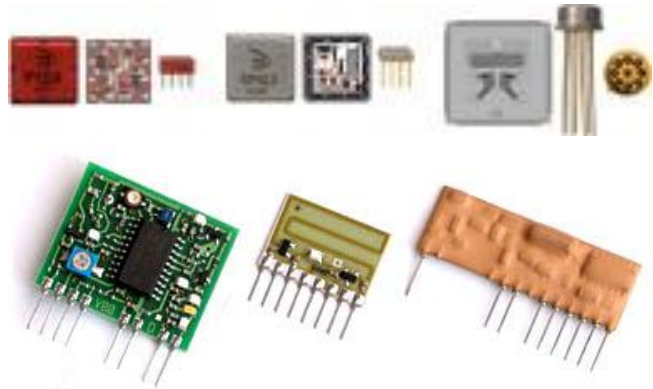


Рис. 5.5 - Микросборки

Чаще всего микросборки выполняются в виде больших корпусных и бескорпусных *гибридных интегральных схем* (ГИС).

Элемент МСБ – неделимая часть микросборки, которую нельзя специфицировать и поставлять как отдельное изделие. Элементами МСБ являются плёночные резисторы, катушки и конденсаторы, выполненные по той или иной технологии на подложке ГИС (Рис. 5.6).

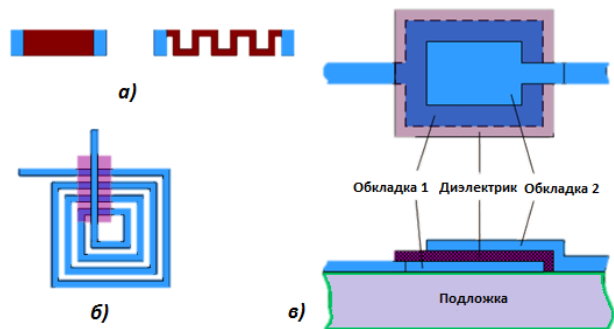


Рис. 5.6 - Конструкции плёночных элементов:
а) - резисторов, б) - индуктивностей и
в) - ёмкостей

Компонент МСБ - часть микросборки, которая специфицируется и может поставляться как отдельное изделие. Компонентами МСБ являются бескорпусные транзисторы, диоды, миниатюрные конденсаторы без проволочных выводов, тороидальные катушки индуктивности, каждый из которых имеет свою особую, с общей спецификой конструкцию, или конструктив (Рис. 5.7).

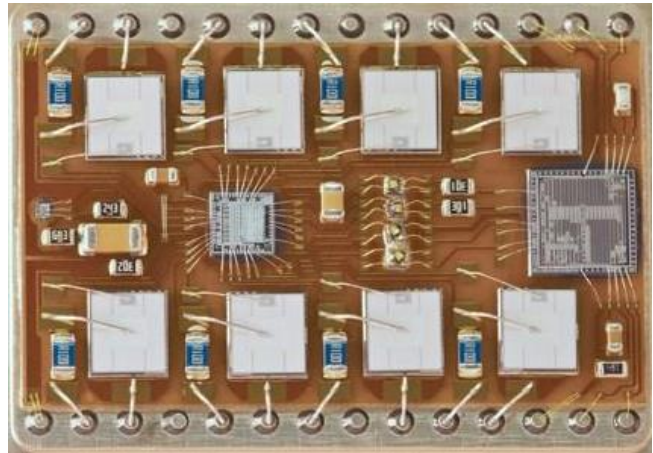


Рис. 5.7 - Микросборка с бескорпусными компонентами

Блок – автономная конструкция РЭС, характеризующаяся системой выходных параметров и имеющая общий кожух, панель – основание и элементы как электрической, так и механической стыковки с другими блоками (Рис. 5.8). Функциональная сложность блока зависит от его элементного базиса.

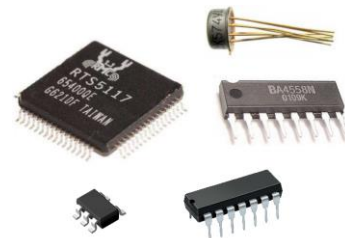


Рис. 5.8 - Блок РЭС

Функциональный узел (ФУ) – конструктивно и функционально законченная часть блока, характеризующаяся определёнными выходными параметрами и собираемая из нескольких радиодеталей. Примерами ФУ могут являться корпусированные ИС, бескорпусные ГИС (МСБ), микромодули, модули на печатном монтаже.

Функциональная ячейка (ФЯ) - объединение в конструктивном отношении нескольких ФУ на общем основании (металлической рамке, печатной плате), но не в общем кожухе с лицевой панелью.

Интегральная микросхема (ИМС, англ. IC - Integrated Circuit) – микроэлектронная схема произвольной сложности (кристалл), изготовленная на полупроводниковой подложке (пластине или плёнке) и помещённая в неразборный корпус или без него (если она входит в состав микросборки). Использование ИМС способствует уменьшению размеров, массы, стоимости и повышению надёжности РЭС



Большая интегральная схема (БИС) содержит тысячи элементов в кристалле. Использование БИС позволяет резко уменьшить число сборочных и монтажных операций, количество внешних недостаточно надёжных соединений.



СБИС – **С**верх **Б**ольшая **И**нтегральная **С**хема (англ. *VLSI - Very Large Scale Integration*), количество элементов (компонентов) в которой может достигать нескольких миллиардов на одном кристалле.

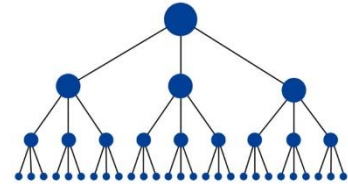
Программируемая Логическая Интегральная Схема (ПЛИС, англ. Programmable Logic Device, PLD) — электронный компонент, используемый для создания цифровых интегральных схем. В отличие от обычных цифровых микросхем, логика работы ПЛИС не определяется при изготовлении, а задаётся посредством программирования (проектирования).

Для программирования ПЛИС используются *программаторы* и отладочные среды, позволяющие задать желаемую структуру цифрового устройства в виде принципиальной электрической схемы или программы на специальных языках описания аппаратуры *Verilog, VHDL, AHDL* и др.

FPGA (от англ. *Field-Programmable Gate Array - Программируемая Пользователем Вентильная Матрица, ППВМ*) — разновидность ПЛИС, которая может быть сконфигурирована производителем или разработчиком после изготовления. Используются в устройствах цифровой обработкой информации — например, в системах телекоммуникации и связи, компьютерной и военной технике, периферийном оборудовании, электробытовых приборах. С помощью программирования на языках проектирования типа *VHDL* и *Verilog* по известной логике работы разрабатываемых заказных микросхем любого уровня сложности, используемых для решения конкретных задач (кстати, очень дорогих в единичном производстве), можно переконфигурировать внутренние блоки FPGA так, чтобы получить полупроводниковые устройства (интегральные микросхемы), выполняющие на аппаратном уровне нужные действия. FPGA перспективны при решения таких задач, как распознавание образов, обработка сложных радиолокационных, оптических, тепловизионных, телевизионных и других сигналов, криптографии и т.п.



Иерархическая структура (греч, *hierarchic, hieros* - священный, *arch* - власть) - последовательное объединение более простых электронных узлов в более сложные, организация их в структуру типа дерево.



Система Автоматизированного Проектирования (САПР, англ. CAD - Computer-Aided Design) - комплекс программных и технических средств, предназначенных для автоматизации процесса проектирования с участием человека, позволяющий освободить проектировщиков РЭС от монотонной, трудоёмкой и утомительной формальной работы и использовать их интеллект на важнейшем этапе – этапе принятия наилучших проектных решений. Многие САПР совмещают в себе решение задач, относящихся к различным аспектам проектирования CAD/CAM, CAD/CAE, CAD/CAE/CAM. Такие системы называют комплексными, или интегрированными. С помощью CAD-средств создаётся геометрическая модель изделия, которая используется в качестве входных данных в системах CAM и на основе которой в системах CAE формируется требуемая для инженерного анализа модель исследуемого процесса.

CAE (от англ. *Computer-Aided Engineering* - Компьютерная инженерия) — средства автоматизации различных инженерных задач: расчётов, анализа и симуляции физических процессов, осуществляют динамическое моделирование, проверку и оптимизацию изделий. Обычно используются численные методы решения дифференциальных уравнений.

ECAD (от англ. *Electronic Computer-Aided Design* - электронное автоматизированное проектирование) или EDA (англ. *electronic design automation* - автоматизация проектирования электроники) - САПР электронных устройств, радиоэлектронных средств, интегральных схем, печатных плат и т.п. (например, *P-CAD, Altium Designer, OrCAD, DipTrace, Delta Design* и др.);

Автоматизированная Система Технологической Подготовки Производства (АСТПП, англ. CAM - Computer-Aided Manufacturing - система подготовки технологического процесса производства изделий, ориентированная на использование компьютеров).

MCAD (англ. *Mechanical Computer-Aided Design* — автоматизированное проектирование механических устройств) - при проектировании РЭС используются для проектирования несущих конструкций, деталей, сборок и др.

SPICE (от англ. *Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis* — симулятор электронных схем общего назначения) - мощная программа, используемая в разработке как интегральных схем, так и печатных плат для проверки целостности схемы и для анализа её поведения. Модели электронных компонентов в формате SPICE представляются в виде описания их схем замещения и фактически являются стандартом для большинства САПР схемотехнического моделирования.

IBIS-модель (сокр. от англ. *Input/Output Buffer Information Specification* - спецификация, описывающая входные и выходные буферы интегральных схем) - это внешнее описание электрического устройства (обычно цифровой высокоскоростной микросхемы), как «чёрного ящика», без учёта его внутренней структуры и особенностей функционирования. Параметры IBIS-моделей получают на основе вольтамперных характеристик (ВАХ) для раз-

личных логических состояний выводов по постоянному току, паразитных параметров корпуса и переходных характеристик на резистивной нагрузке. Моделирование с помощью IBIS-моделей позволяет провести оценку целостности сигналов, определить работоспособность изделия уже на этапе проектирования, значительно сокращая объем расчётов по сравнению с использованием полных эквивалентных SPICE-моделей интегральных схем. Наблюдается массовый переход от SPICE к IBIS-моделям микросхем.

STEP-формат (от англ. *STandard for Exchange of Product model data* — стандарт обмена данными модели изделия) используется в качестве универсального формата данных, обеспечивающего единообразную логическую структуру описания, интерпретацию и электронный обмен электронной технической документацией между многими CAD-программами на всех этапах жизненного цикла РЭС. Файлы формата STEP AP214 передают информацию о механических и электрических схемах, геометрии и размерах 3D-моделей, их цветах, топологии и др.

Автоматизированное рабочее место (АРМ) - программно-технический комплекс, предназначенный для автоматизации деятельности определённого вида. В нашем случае обеспечивает взаимодействие проектировщика РЭС с компьютером, предоставляя возможность ввода информации (через клавиатуру, компьютерную мышь, сканер и пр.) и её вывод на экран дисплея, принтер, графопостроитель или иные устройства вывода.

ЧПУ - числовое программное управление (англ. *Computer Numerical Control, CNC*) — компьютеризованная система управления, управляющая приводами технологического оборудования, включая станочную оснастку.

Реинжиниринг (обновление) - деятельность по модернизации ранее реализованных технических решений на действующем объекте.

5.2 Информационные технологии

Мировое сообщество вступило в новый этап своего развития - перехода от индустриального к *информационному обществу*, когда информация и информационные ресурсы на мировом рынке становятся важнейшим высокотехнологичным продуктом.

Не случайно компании, разрабатывающие и использующие информационные технологии, занимают ведущие позиции в мировой экономике, определяют дальнейшие направления развития конкурентоспособной продукции.

Важнейшие черты современных ИТ:

- компьютерная обработка информации;
- хранение значительных объёмов информации на компьютерных носителях;
- передача информации на любые расстояния в кратчайшие сроки.

В наши дни практически нет продукции, включая услуги, которая бы не содержала или не использовала электронных средств. Жизнь каждого современного человека так или иначе связана с применением РЭС [7]. ИТ и электроника вместе с компьютерной техникой являются основой создания высоких технологий, открывают новые потенциалы в повышении эффективности производственных процессов, выводят на новый уровень автоматизацию технологических процессов и управленческий труд, обеспечивают групповое ведение проектных работ с использованием интернет-технологий.

Сложный и противоречивый процесс создания современных РЭС, функционирование которых основано на передовых научно-технических достижениях, учитывающих новейших физические, химические и иные явления, способствует развитию производительных сил российского общества и удовлетворению его потребностей в продукции более высокого качества.

В ходе проектирования РЭС следует стремиться к созданию высокоэффективных, надёжных, эргономичных РЭС, оптимальных по массогабаритным параметрам и стоимости, производство и эксплуатация которого потребуют наименьшего расхода трудовых, энергетических и материальных ресурсов.

Для достижения этой цели как правило решают следующие основные задачи:

- комплексная микроминиатюризация
- обеспечение высокой надёжности
- защита от дестабилизирующих факторов (тепла, влаги, механических воздействий и др.)
- повышение технологичности.

Процесс проектирования РЭС можно расчленить на ряд частей (стадий, этапов, проектных процедур), результатом выполнения любой из них является некоторое *проектное решение*.

Проектное решение - промежуточное или окончательное описание объекта проектирования, необходимое и достаточное для рассмотрения и определения дальнейшего направления или окончания проектирования. **Эффективное проектное решение** – описание объекта, принципиально выполняющего требуемые функции или проектное решение, принципиально, удовлетворяющее требованиям *технического задания* (ТЗ). **Оптимальное проектное решение** – описание объекта, *наилучшим образом* выполняющего требуемые функции или проектное решение, наилучшим образом отвечающее требованиям ТЗ.

Маршрут (алгоритм) проектирования - это последовательность *проектных процедур* и элементарных *проектных операций*, ведущая к получению требуемых проектных решений.

Проектная процедура - формализованная совокупность проектных операций, выполнение которых оканчивается проектным решением.

Примерами проектных процедур могут служить:

- разработка чертежа изделия;
- моделирование переходного процесса;
- расчёт характеристик усилителя;
- выбор типовой конструкции функционального узла и др.

Проектная операция - условно выделенная часть проектной процедуры, элементарное действие или формализованная совокупность действий, составляющих часть проектной процедуры, алгоритм которых остаётся неизменным для ряда проектных процедур.

Примерами проектных операций могут служить:

- подготовка исходных данных для электрического расчёта;

– при тепловом анализе РЭС сеточными методами операциями могут быть построение сетки, выбор или расчёт температурных воздействий, собственно моделирование тепловых полей, представление результатов моделирования в графической и текстовой формах и т.д.

Разумно проектные процедуры выполнять с помощью компьютера, а разработчику настраивать их на поиск наилучшего (оптимального) допустимого технического решения, участвовать в оценке вариантов по разным показателям качества, принимать проектные решения в сложных, неоднозначных ситуациях.

Проектные процедуры, достаточно часто применяемые при проектировании всевозможных РЭС, называют *типовыми*. Их выполнение обычно стремятся автоматизировать в первую очередь.

Любые задачи, решаемые при проектировании РЭС, реализуются с помощью типовых проектных процедур *синтеза, анализа или оптимизации*.



Анализ (от греч. *analysis* - разложение) – расчленение (мысленное или действительное) объекта проектирования на простые составные части для рассмотрения их свойств. В ходе анализа определяются свойства проектируемого изделия и оценивается степень соответствия проектных решений требованиям технического задания. В процессе анализа не создаются новые объекты, а лишь оценивается степень удовлетворения проектного решения заданным требованиям и его пригодность. Например, рассчитываются статические и динамические (временные, частотные) характеристики электрических схем, проводится анализ чувствительности, тепловых режимов и т.п.

Выполнение анализа и сопоставление полученных результатов с опытными (эталонными или эмпирическими) значениями называют процедурой **верификации** (проверки, подтверждения того, что установленные требования были выполнены).



Синтез (от греч. *synthesis*) - соединение (мысленное или действительное) составных частей, полученных в процессе анализа объекта в единое целое (систему) с учётом их единства и взаимной связи. В ходе синтеза в соответствии требованиями ТЗ получают новые описания проектируемого объекта или его частей. Например, разрабатывается конструкция устройства по заданным электрической схеме, а также частотным или временным характеристикам.

При **структурном синтезе** создаётся *структура объекта*, т.е. определяются перечень компонентов с указанием их типов и описанием важнейших характеристик, устанавливается расположение компонентов и способы их связи, алгоритмы функционирования и т.д.

При **параметрическом синтезе** отыскиваются числовые значения параметров элементов проектируемого объекта, учитывая, что его структура и условиях работоспособности уже известны.

Оптимизация — выбор наилучшего варианта из множества возможных. Задача оптимизации решается нахождением экстремума (минимума или максимума) целевой функции в некоторой области конечномерного векторного пространства (пространства проектирования), ограниченной набором линейных и/или нелинейных равенств и/или неравенств (Рис. 5.9).

Целевая функция (критерий качества) $F(X)$ - это выражение, характеризующее качество проектируемого объекта, значение которого необходимо минимизировать или максимизировать, подобрав значения совокупности *проектных параметров X* (независимых переменных величин, которые полностью и однозначно количественно определяют решаемую задачу проектирования).

Проектные параметры являются неизвестными величинами. Их значения изменяют в ходе оптимизации, чтобы улучшить характеристики РЭС и режимов работы её элементов. В качестве проектных параметров могут служить неизвестные значения размеров, массы и формы объекта, параметров ЭРЭ, токов и напряжений в электрической схеме, времени, температуры и других свойств проектируемого изделия. Область допустимых решений целевой функции ограничена рядом условий в виде системы равенств и/или неравенств, связанных с возможностями реализации проектных параметров.

Итерационность процесса проектирования. Процесс проектирования обычно носит *итерационный (циклический) характер*, так как многие решения в этом процессе принимаются в условиях недостаточно полной информации. Отсюда нередко ситуации, когда принимают необоснованные решения, не реализуемые на практике по тем или иным причинам. Их исправление происходит путём многократного повторного выполнения этапов или проектных процедур с уточнёнными входными данными.

Типовой итерационный маршрут выполнения любого этапа проектирования показан на Рис. 5.10.

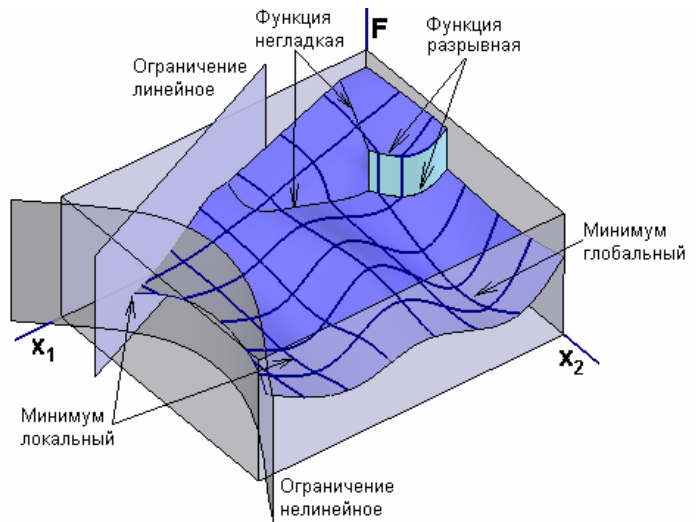


Рис. 5.9 – Поверхность отклика ограниченной целевой функции $F(x_1, x_2)$



Рис. 5.10 - Схема итерационного маршрута получения проектного решения

Такой маршрут подразумевает:

- 1) формирование или корректировку *частного технического задания* (ЧТЗ) для некоторого этапа или проектной процедуры;
- 2) синтез необходимого числа допустимых альтернативных вариантов проекта, для которых выполняются все условия и ограничения ТЗ;
- 3) построение или выбор структурной и параметрической модели варианта проекта;
- 4) анализ и оценка каждого варианта проекта на соответствие ТЗ.
- 5) выбор наилучшего проектного решения, в соответствии с установленными правилами сравнительной оценки вариантов или критериями оптимальности.

Обратные связи в этом маршруте позволяют перейти к новому варианту проекта, если ранее синтезированный вариант даёт неудовлетворительные результаты.

Технологии проектирования. Существуют различные *технологии проектирования*:

- *ручное* (без применения компьютера);
- *автоматическое* (выполняется компьютером без вмешательства человека);
- *автоматизированное* (часть работ выполняется с использованием компьютера, а часть – вручную.)

Недостатки ручного проектирования:

- человек плохо хранит подробную информацию, проектирует медленно и быстро устаёт, поэтому неизбежно возникают ошибки;
- сокращение сроков проектирования возможно лишь за счёт увеличения численности проектировщиков:
- производительность труда в коллективе проектировщиков существенно ниже из-за необходимости частого согласования действий.

**Недостатки автоматического проектирования:**

- невозможность реализации из-за чрезвычайной сложности исчерпывающей формализации многих проектных процедур, трудностей в принятии проектных решений компьютером при большом числе критериев оценки и в условиях значительной информационной неопределённости

**Достоинства автоматизированного (диалогового, интерактивного) проектирования:**

- учитывает творческие возможности и интеллект человека, позволяющие настраивать компьютер на поиск лучшего технического решения, участвовать в оценке вариантов по многим показателям качества, принимать проектные решения в сложных, неоднозначных ситуациях;
- учитывает высокое быстродействие компьютеров, большой объем памяти, позволяющий хранить подробное, детальное представление об объекте неопределённо долго и т.д.



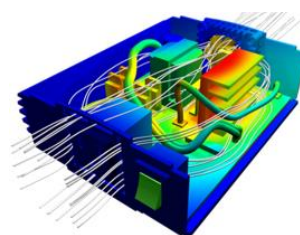
Информационные технологии проектирования РЭС. Поднять производительность труда проектировщиков, повысить качество, удешевить и сократить сроки проектирования можно с помощью эффективных *информационных технологий проектирования РЭС* [8,9,10,11], обобщающих опыт работы высококвалифицированных разработчиков РЭС на базе применения компьютеров и современных вычислительных методов, теории графов, методов математического программирования, исследования операций, и т.д.

Под *информационными технологиями проектирования РЭС* (ИТП РЭС) будем понимать систематическое применение компьютеров в процессе проектирования РЭС при рациональном распределении функций между проектировщиком и компьютером.

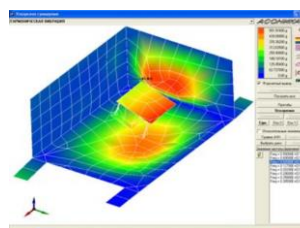
Разработка современных РЭС с использованием информационных технологий обеспечивает гармоничное сочетание инструментов автоматизации проектно-конструкторских работ с интеллектуальным потенциалом и опытом проектировщиков.

Применение ИТП РЭС даёт целый ряд преимуществ перед ручным проектированием, обеспечивающих конкурентоспособность создаваемой продукции.

1. Повышается технико-экономический уровень проектируемых РЭС. При проектировании на основе ИТ увеличивается число рассматриваемых альтернативных проектных решений, что способствует улучшению показателей качества РЭС: уменьшению габаритов, массы, стоимости, энергопотребления, повышению надёжности и т.п.



Широкое внедрение методов оптимального проектирования также позволяет обеспечить эффективную защиту от дестабилизирующих факторов: влаги, тепловых, механических, радиационных, биологических и электромагнитных воздействий. Возможен более детальный, многовариантный анализ с помощью разнообразных математических моделей и методов оптимизации.



2. Улучшается качество исполнения проектов. При ручном выполнении проекта точность чертежей определяется остротой зрения проектировщика, толщина линий зависит от нажима на карандаш и качества его заточки, наклоны и параллельность линий зависят от качества чертёжных инструментов.



При использовании компьютера качество выполнения чертежа не зависит от мастерства разработчика, так как современные периферийные устройства (принтеры, плоттеры) рисуют линии и тексты независимо от индивидуальных способностей человека.

3. Повышается производительность труда, сокращается время проектирования. Например, графическая документация на компьютере разрабатывается не менее чем в 3 раза быстрее, чем традиционно.



С помощью 3D-принтеров, использующих метод послойного создания физического объекта по цифровой 3D-модели, возможно уже на этапе проектирования оперативное изготовление прототипов моделей и объектов для дальнейшей доводки конструкции узла или объекта в целом. Например, 3D-печать корпусов РЭС, телефонов и другого радиоэлектронного оборудования (в том числе и в случае мелкосерийного производства).



4. Снижается стоимость проектирования. Проектирование на основе ИТ создаёт предпосылки к росту экономической эффективности за счёт сбережения трудовых, материальных и природных ресурсов, повышения производительности труда, технологичности, надёжности, гибкости и т.д. Уменьшается влияние человеческого фактора позволяет снизить риски возникновения ошибок вследствие недостаточной компетенции разработчиков, ошибок при ручных расчётах и т.п.



5. Сокращаются затраты на усовершенствование РЭС. Быстрее и эффективнее воплощаются в жизнь новые требования, выдвигаемые заказчиком. С незначительными затратами труда оперативнее и качественнее осуществляется модернизация ранее созданных текстовых и графических документов прототипа.



5.3 Стадии и этапы жизненного цикла РЭС



По мере усложнения РЭС происходит резкий рост объёмов технической документации. Применение информационных технологий даёт возможность разработчику РЭС использовать принципиально новые инструменты и подходы для сокращения сроков разработки и подготовки производства, улучшения технических и экономических показателей, новых и модернизируемых РЭС. Кроме того, применение ИТ позволяет

перестроить предприятия в соответствии с современными требованиями повышения качества и конкурентоспособности изделий.

При использовании бумажной документации возникают значительные трудности при поиске необходимых сведений, внесении изменений в конструкцию и технологии изготовления изделий. Возникает множество ошибок, на устранение которых затрачивается много времени. В результате резко снижается эффективность всех видов деятельности, связанной с разработкой, производством, эксплуатацией, обслуживанием, ремонтом изделий.

Преодоление этих трудностей в проектировании РЭС потребовало новых концепций и новых идей. Базовой стала идея *информационной интеграции* стадий жизненного цикла продукции. Эта идея состоит в отказе от «бумажной среды», в которой осуществляется традиционный документооборот и переходе к **интегрированной информационной среде** (ИИС), охватывающей все стадии ЖЦ изделия (Рис. 5.11).



Рис. 5.11 - Этапы жизненного цикла РЭС

Информационная среда - совокупность распределённых баз данных, в которой действуют единые стандартные правила хранения, обновления, поиска и передачи информации, через которую осуществляется безбумажное информационное взаимодействие между всеми участниками ЖЦ изделия независимо от места и времени получения информации в общей системе.

В общем случае в соответствии со стандартом качества продукции «ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования» к основным этапам жизненного цикла изделий относят:

- *маркетинг* и изучение рынка - формулирование потребительских свойств РЭС, благодаря которым оно найдёт своего покупателя на рынке аналогичных товаров;
- *проектирование продукта* (реализация технических требований в виде комплекта документации);
- *планирование и разработка процессов* (технологий производства, эксплуатации и т.п.);
- *закупки*;
- *производство или предоставление услуг*;
- *упаковка и хранение*;
- *реализация*;
- *установка и ввод в эксплуатацию*;
- *техническая помощь и обслуживание*;
- *послепродажная деятельность или эксплуатация*;
- *утилизация* и переработка в конце полезного срока службы.

Содержание и продолжительность этапов жизненного цикла зависят от конкретного вида РЭС, его назначения, научно-технического уровня и технологии, существующих в обществе на данный момент времени.

Важнейшим вопросом в сфере производства новой техники является прогнозирование. Вначале у общества возникает потребность в том или ином виде РЭС. Определение главных направлений исследований и разработок проводится в ходе *научно-исследовательских работ* (НИР) и *опытно-конструкторских работ* (ОКР).

На этапе НИР («ГОСТ 7.32-2017. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчёт о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления») формируются целевая функция РЭС и совокупность требований (функциональных, эксплуатационных, конструктивных, технологических, эргономических, эстетических, экономических и экологических), которым должны отвечать разрабатываемое РЭС.

На поисковом этапе НИР с помощью информационно-поисковых систем (*Google*, *Yandex* и т.п.) в Интернете ищут **аналоги** проектируемого изделия (выпускаемые и имеющиеся в продаже изделия, выполняющие нужные функции). Наиболее близкий аналог, совпадающий по наибольшему количеству признаков требованиям ТЗ, называется **прототипом**. После детального исследования прототипа следует обосновать необходимость дальнейшей разработки, что позволяет исключить неоправданные затраты на разработку новых РЭС, а также эффективно использовать номенклатуру существующих изделий.

Результатом НИР является согласование всех требований между заказчиком и исполнителем, которое оформляется в форме *технического задания* (ТЗ), которое является юридическим документом и согласуется руководством заказчика и исполнителя.

Техническое задание («ГОСТ 15.016-2016. Система разработки и постановки продукции на производство. Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению») - исходный документ на проектирование РЭС.

В ТЗ излагаются основное назначение и область применения разрабатываемой РЭС, технические, конструктивные, эксплуатационные и экономические требования, показатели качества, условия хранения и транспортирования, требования по надёжности, правила проведения испытаний и приёмки образцов в производстве, ожидаемые результаты проектирования, сроки его выполнения. Кроме того, в ТЗ устанавливаются комплектность документации (конструкторской, технологической и т. д.) после выполнения каждого этапа проектирования РЭС.

В ходе **опытно-конструкторских работ** (ОКР) («ГОСТ Р 15.301-2016. Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство») проверяются теоретические предпосылки решения научных проблем.

ОКР по разработке продукции и постановке её на производство предусматривает:

- разработку ТЗ на ОКР;
- проведение ОКР, включающей разработку КД и ТД, изготовление опытных образцов, испытания опытных образцов, приёмку результатов ОКР;
- доработку рабочей КД опытного образца;
- постановку на производство, включающую подготовку производства, освоение производства (изготовление установочной серии, квалификационные испытания).

При выполнении ОКР устанавливаются следующие этапы:

- разработка **технических предложений** (ТП) («ГОСТ 2.118-2013 ЕСКД. Техническое предложение») в соответствии с ТЗ с целью технического и технико-экономического обоснования целесообразности разработки КД изделия, на основании анализа различных вариантов возможных решений изделий, сравнительной оценки решений с учётом конструктивных и эксплуатационных особенностей разрабатываемого и существующих изделий, а также с целью выявления дополнительных или уточнённых требований к изделию (технических характеристик, показателей качества и др.), которые не могли быть указаны в ТЗ;
- разработка **эскизного проекта** (ЭП) («ГОСТ 2.119-2013 ЕСКД. Эскизный проект») в соответствии с ТЗ с целью установления принципиальных конструктивных решений, дающих общее представление об устройстве, принципах работы и габаритных размерах разрабатываемого изделия, а также данных, определяющих его основные параметры, когда это целесообразно сделать до разработки ТП или рабочей КД;
- разработка **технического проекта** (ТП) («ГОСТ 2.120-2013 ЕСКД. Технический проект») в соответствии с ТЗ с целью выявления окончательных технических решений, дающих полное представление об устройстве разрабатываемого изделия, и исходных данных для разработки рабочей КД, когда это целесообразно сделать до разработки рабочей КД;
- разработка **рабочей конструкторской документации** (РКД) для изготовления опытного образца изделия в соответствии с «ГОСТ 2.102-2013 ЕСКД. Виды и комплектность конструкторских документов»);
- изготовление опытного образца изделия и проведение предварительных испытаний;
- проведение государственных испытаний опытного образца изделия (межведомственных испытаний опытного образца изделия);
- утверждение рабочей конструкторской документации для организации промышленного (серийного) производства изделий.

На всех стадиях жизненного цикла изделия вместо документов в бумажной форме целесообразно использовать документы в электронной форме («ГОСТ 2.051-2013 ЕСКД. Электронные документы. Общие положения»), которые получают либо с помощью программно-технических средств в результате автоматизированного проектирования, либо преобразования в электронную форму документов, выполненных в бумажной форме.

Для повышения эффективности управления процессами проектирования и производства продукции с высокими потребительскими свойствами и к сложной наукоёмкой продукции, каковыми являются РЭС, рекомендуется применение **технологии CALS** (англ. *Continuous Acquisition and Life-Cycle Support* - непрерывная информационная поддержка поставок и жизненного цикла изделий) на всех стадиях жизненного цикла РЭС, в рамках которой существующие автоматизированные системы объединяются и интегрируются и, в случае необходимости, дополняются новыми технологиями.

CALS-технология представляет собой программно-технический комплекс в виде интегрированных ИТ-поддержки всех этапов жизненного цикла продукции, соответствующих требованиям CALS-стандартов. CALS-технология основывается на стандартизации методов

представления данных на каждой стадии жизненного цикла изделия и на безбумажном электронном обмене данными, в соответствии с которыми строится электронное взаимодействие всех участников процессов проектирования, производства, испытания и т.д.

Впервые *CALS*-технология использована Министерством обороны США (1985 г.) в рамках глобальной автоматизированной системы электронного описания всех этапов проектирования, производства и эксплуатации продуктов военного назначения. По данным различных зарубежных источников, внедрение *CALS* в полном объёме позволяет на 25-30 % повысить эффективность производства наукоёмкой продукции при одновременном значительном повышении его качества, а также в несколько раз сократить время на корректировку проектов.

По *CALS*-технологии разработаны и ряд основополагающих Российских стандартов серии ГОСТ Р ИСО 10303-1-99 [12], являющихся *аутентичными переводами* (соответствующими подлинному) соответствующих международных стандартов.

При использовании технологии *CALS* информационная поддержка реализуется в соответствии с требованиями системы международных стандартов **STEP**.

5.4 Системный подход к проектированию РЭС

Одной из важнейших особенностей современных методов проектирования РЭС, подвергающихся всевозможным воздействиям дестабилизирующих факторов, позволяющих избежать односторонних ошибочных представлений и решений, является применение **системного подхода** [8,9].

В технике **система** означает сложную совокупность объектов, связей процессов, требований и ограничений, предназначенных для реализации заданных функций. Любое РЭС можно представить как **систему**.

Система (от греч. *συστημα* - целое, составленное из частей; соединение) - совокупность взаимосвязанных разнородных объектов, совместно выполняющих заданные функции, решающих общую задачу в условиях взаимодействия с внешней средой, с учётом развития и противоречий. Система приобретает новые свойства, которые отсутствуют у составляющих её объектов в отдельности.

Системы РЭС характеризуются:

- иерархической структурой (набор параметров системы любого иерархического уровня определяется системой верхнего уровня и в свою очередь служат исходными данными для системы расположенной уровнем ниже);
- высокой сложностью задач (конструкция состоит из большого числа устройств, узлов, блоков и компонентов);
- наличием огромного числа допустимых вариантов решения;
- необходимостью учёта многообразных ограничений и влияющих факторов;
- связью с внешней средой (в том числе и с человеком-оператором).

Типичными для систем свойствами обладают космические, связные и навигационные РЭС, радиолокационные комплексы, системы управления движущимися объектами (Рис. 5.12), компьютеры и компьютерные сети и т.д.



Рис. 5.12 - Комплекс бортовых подсистем перспективного российского скоростного вертолета пятого поколения [55]

С одной стороны, чтобы разработчик мог представить себе задачу проектирования сложного РЭС в целом, он вынужден прибегать к абстракции очень высокого уровня – т.е. пренебрегать не очень важными деталями и использовать для анализа идеализированную модель. В то же время, для изготовления, спроектированного РЭС требуется очень детальное его описание. Поэтому использование системного подхода вначале предполагает расчленение (**декомпозицию**) представлений об объекте проектирования, включая модели, математический аппарат для построения алгоритмов проектирования, постановки проектных задач, формы документации и т.п., на ряд иерархических уровней (элементов), называемых *уровнями абстрагирования*. Цель декомпозиции - замена проектной задачи чрезмерной сложности некоторым числом задач допустимой сложности. Каждому уровню абстрагирования соответствует своё определение системы и элемента, своя математическая модель, свои математические методы.

Если в результате декомпозиции мы всё же получим сложный элемент, то этот элемент можно рассматривать как систему более низкого ранга, чем исходная система, и продолжить процесс декомпозиции до тех пор, пока части системы не станут элементарными, доступными для изучения и проектирования.

Применительно к конструированию РЭС системный подход именуется часто *блочно-иерархическим подходом* (Рис. 5.13). Число уровней иерархии зависит от класса аппаратуры и уровня технологии её изготовления:

– **0 уровень:** *компонент*. Это неделимые части интегральных микросхем (ИМС), которые нельзя вычленишь, поставить как отдельное изделие

(топологические фрагменты функциональных ячеек и отдельных компонентов);

– **1 уровень:** *элемент*. Состоит из взаимосвязанных компонентов, которые могут поставляться. Это, например, дискретные электрорадиоэлементы (ЭРЭ) - микросхемы, транзисторы, резисторы, конденсаторы и т.п.

– **2 уровень:** *печатный узел (ПУ), ячейка, типовой элемент замены (ТЭЗ) и т.п.* Объединяет с помощью электрических соединений элементы 1 уровня. Отличительной чертой узлов является то, что они не имеют самостоятельного функционального значения.

– **3 уровень:** *блок*. В них могут быть использованы десятки элементов первого уровня. Блоки отличаются тем, что могут иметь самостоятельное функциональное значение и могут быть использованы как отдельные электронные устройства. Характерным является наличие у блоков органов управления, настройки, контроля и сопряжения с другими блоками аппаратуры.

– **4 уровень:** *стойки и шкафы*. В них могут объединяться несколько блоков, входящих в систему данной аппаратуры. Конструкция стоек предусматривает наличие всех системных соединений блоков, обеспечение их источниками питания и вентиляцией.

Обратите внимание, что каждый конструктив последующего уровня состоит из нескольких конструктивов предыдущего уровня, размещаемых в некоторой несущей конструкции (каркасе) и соединяемых между собой проводным монтажом, печатными соединениями, гибкими шлейфами, печатными объединительными платами и т.п.

Успехи в микроминиатюризации РЭС приводят к сокращению числа иерархических уровней. Так использование СБИС даёт возможность конструктивно реализовать многие устройства или их крупные фрагменты (например, микроконтроллеры, сотовые телефоны и др.) целиком на одной печатной плате или в одном кристалле (англ. *System on a Chip, SoC* – система на кристалле) (Рис. 5.14). Меньшее количество корпусов электрорадиоэлементов в РЭС существенно упрощает монтаж. Кроме того, моноблочные РЭС обычно потребляют меньше энергии, стоят дешевле и работают надёжнее, чем наборы микросхем с той же функциональностью.

После завершения проектирования элементарных частей самого низкого ранга системы начинается обратный процесс - **композиция** (объединение) этих частей в подсистемы более высокого ранга и так до тех пор, пока не получим искомую систему.



Рис. 5.13 - Уровни конструкторской иерархии

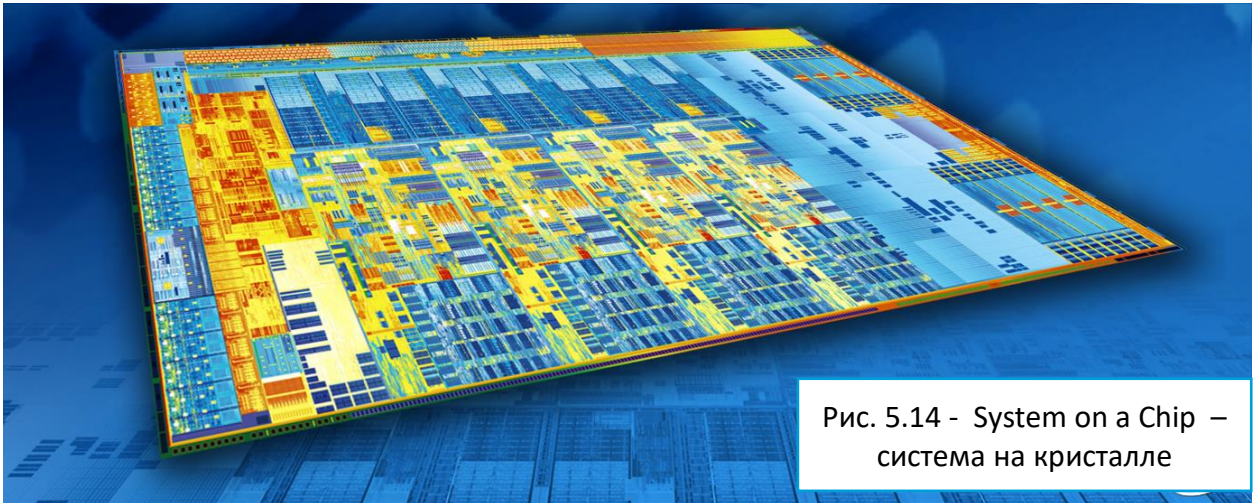


Рис. 5.14 - System on a Chip – система на кристалле

Используя методы декомпозиции и композиции нельзя забывать один из основных принципов системы – **целостность**: целое не может быть познано без знания части этого целого, однако само целое может не являться простой суммой свойств его составляющих.

Системный подход напрямую связан с широким использованием **базового метода проектирования РЭС** [13], в основу которого положено деление аппаратуры на конструктивно и функционально законченные части - **модули**.

Модуль - составная часть РЭС (иерархический элемент), выполняющая в конструкции подчинённые функции, имеющая законченное функциональное и конструктивное оформление и снабжённая элементами коммутации и механического соединения с подобными модулями и с модулями низшего уровня в РЭС. Особенность модульных составных частей заключается в подчинении их габаритов и присоединительных размеров установленным для такого проектного модуля определённым соглашениям по взаимозаменяемости, с тем чтобы он стал *унифицированным*.

В зависимости от функциональной и конструктивной унификации на уровне модулей, функциональных узлов или блоков различают разновидности базового метода: *функционально-модульный, функционально-узловой и функционально-блочный методы конструирования*.

Основные принципы построения модульных конструкций изделий: важно, чтобы модуль содержал не просто наборы радиоэлементов, относящихся к разным частям РЭС, а предоставлял устройство, выполняющую вполне определённую функцию. Подобные функционально законченные узлы и блоки могут быть одновременно, независимо друг от друга, спроектированы, отрегулированы и проверены. Для облегчения обслуживания и улучшения ремонтпригодности любой такой модуль может быть снабжён специальной индикацией, которая будет выдавать информацию о неисправностях. Функциональная законченность модулей позволяет без существенных затрат постоянно совершенствовать РЭС, упрощает и ускоряет внесение изменений в них, проводя независимую модификацию отдельных модулей.

Используя многоуровневый иерархический подход, проектирование РЭС можно вести различными способами - либо «снизу-вверх» (используя готовые модули), либо «сверху вниз» (проектируя модули в контексте общей конструкции).

Разработка по принципу «**снизу-вверх**» начинается от компонента нижнего уровня, далее переходят к разработке компонента следующего уровня иерархии и т.д. Достоинством этого принципа является то, что при переходе к разработке компонентов более высокого уровня иерархии компоненты проекта нижних уровней можно считать готовыми и включать их к проектируемым компонентам верхнего уровня. Однако на практике при таком подходе отсутствие целостного взгляда на весь проект с позиций верхнего уровня, определяющего цели проекта, не позволяет во многих случаях принимать верные решения, что приводит к повторной разработке или значительной корректировке компонент проекта. Такое может, например, случиться, если проектирование печатного узла или какого-либо другого модуля начинается без учёта размеров и общего замысла конструкции РЭС в целом. Проектирование РЭС полностью по принципу «снизу-вверх» возможно лишь для сравнительно небольших РЭС, ограниченных по количеству несколькими модулями, когда разработчики способны оценивать в любое время структуру его в целом, а также структуру и функции отдельных модулей на всех уровнях иерархии.

Смысл проектирования «**сверху-вниз**» состоит в том, что оно даёт обозримое описание на каждой стадии, а также представление взаимосвязей всех составных частей проекта. Такой подход позволяет своевременно замечать возникающие проблемы и не переходить к последующей детализации до тех пор, пока полностью не завершено проектирование на предыдущем уровне. Поэтому при разработке РЭС (особенно сложных, содержащих большое количество модулей) наиболее рациональным подходом является именно проектирование «сверху-вниз».

Тем не менее, реально разумно применять оба подхода одновременно (например, при модернизации РЭС):

- «снизу-вверх» — при включении в проект хорошо зарекомендовавших себя готовых модулей;
- «сверху-вниз» — при объединении их в единую конструкцию.

Таким образом, **системный подход** к проектированию РЭС предполагает установление связей между объектами и явлениями сверху вниз (иерархический принцип) и на каждом уровне (горизонтальный принцип). При этом целесообразно подвергать рассмотрению следующие вопросы:

- анализ технико-экономических требований к конструкции РЭС;
- всесторонний анализ факторов взаимодействия проектируемого РЭС с внешней средой;
- учёт внутренних взаимодействий и связей между модулями РЭС - функциональных, конструктивных, динамических, информационных, тепловых, электромагнитных, механических и т.п.;
- обнаружение основных технических противоречий, препятствующих созданию РЭС;
- согласование устройств отображения информации и органов управления с эргономическими и эстетическими требованиями деятельности человека-оператора РЭС;

- учёт возможности обеспечения требований комплексной миниатюризации, надёжности, стандартизации и технологичности;
- оценку элементной базы, способов электрических соединений, соединителей, материалов и покрытий предлагаемой конструкции РЭС;
- учёт всех этапов жизненного цикла РЭС - производства, эксплуатации, утилизации;
- учёт истории и возможного будущего развития РЭС: старые решения в новых условиях и для новых функций могут возродиться, а неконкурентные решения в будущем могут стать удачными и т.д.

Применение системного подхода позволяет распараллелить проектирование между несколькими разработчиками, снизить экономические и временные затраты на разработку, подготовку производства и освоение РЭС, обеспечить совместимость и преемственность принимаемых решений с одновременным улучшением качества, увеличением надёжности и срока службы РЭС при эксплуатации.

6 Системы автоматизированного проектирования

Проектирование современных РЭС заключается в принятии множества проектных решений по принципам их действия, схемам электрическим принципиальным, элементной базе, конструкции, дизайну, предлагаемым технологическим процессам изготовления, решению основных проблем технической эксплуатации [14,15,16,17,18,19,20,21,22,23]. Это процесс непрерывного уточнения модели проектируемого РЭС от замысла в виде технического задания (ТЗ) к готовому проекту. Преодолевая всевозможные ограничения технического задания, в процессе создания новых РЭС проектировщик стремится выбрать оптимальную пространственную компоновку узлов и блоков, составляющих РЭС, обеспечить их электрическое и механическое соединение и защиту от неблагоприятных воздействий внешних факторов и помех.

Первостепенное требование при проектировании РЭС заключается в том, чтобы создаваемое устройство было эффективнее своего аналога, т.е. превосходило его по качеству функционирования, степени миниатюризации и технико-экономической целесообразности.

Поднять производительность труда проектировщиков, повысить качество, удешевить и сократить сроки проектирования можно с помощью эффективных информационных технологий проектирования РЭС [8,9,10], обобщающих опыт работы высококвалифицированных разработчиков РЭС на базе применения компьютеров и современных вычислительных методов, теории графов, методов математического программирования, исследования операций, и т.д.

Наилучшая форма организации информационных технологий проектирования РЭС - использование *комплексных (интегрированных)* САПР, совмещающих в себе решение задач, относящихся к различным аспектам проектирования CAD/CAM, CAD/CAE, CAD/CAE/CAM.

К сожалению, в настоящее время подобных САПР, охватывающих все этапы проектирования РЭС, пока ещё не создано. Тем не менее, существует немалое количество САПР, реализующих значительную часть проектных процедур проектирования РЭС [24]. Возможные варианты подобного комплексирования нескольких САПР, обеспечивающих решение большинства из стоящих перед проектировщиком РЭС задач, могут включать следующие составляющие.

6.1 Конструкторские (САМ) САПР

6.1.1 «Solid Works» – система инженерного трёхмерного моделирования



САПР среднего класса [Solid Works](#) [25,26,24,27,28] считается одним из мировых лидеров в области передовых технологий конструкторского и технологического синтеза, а также динамического моделирования деталей и сборок в трёхмерном пространстве (3D-проектирования).

Это мощное средство проектирования, с помощью которого осуществляется поддержка изделий любой сложности и назначения на всех этапах жизненного цикла, инженерного анализа и подготовки производства в полном соответствии с концепцией *CALS*-технологий, способное стать ядром интегрированного комплекса автоматизации предприятия.

Основными геометрическими моделями любого проекта в SolidWorks являются твердотельные модели деталей (в том числе изготовленные литьем, сваркой и из листового материала) с последующим полуавтоматическим выполнением их рабочих чертежей, содержащих все необходимые типы изображений.

В **параметрических моделях** *SolidWorks* все геометрические размеры являются переменными, которые можно связывать алгебраическими операциями в формулы. Пользователь может вводить и свои *глобальные* (промежуточные) переменные, чаще всего не связанные с геометрией модели. Значения параметрических параметров могут быть выражены с помощью обычных переменных, рассчитаны по формулам или выбраны из баз данных.

Использование параметрических размеров помогает так построить модель, что изменение конструкции становится простой задачей изменения размеров, давая реальные средства для создания прототипов стандартных изделий (крепёжа, типовых несущих конструкций и т.п.).

В результате применения операций сочленения детали впоследствии сводятся в сборки (Рис. 6.1) без ограничения их сложности. Одни и те же детали могут использоваться в разных сборках.

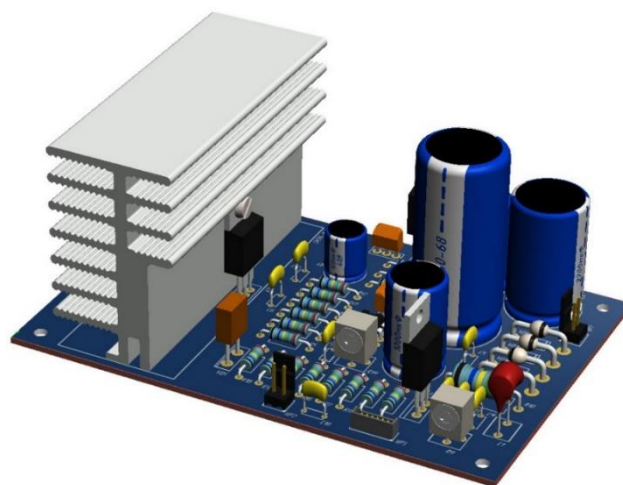


Рис. 6.1 - Печатный узел, спроектированный в САПР *Solid Works*

Поддерживаются:

- управление моделью и поиск её элементов с помощью *дерева конструирования* (англ. *Feature Manager*);
- 2D и 3D эскизы деталей и сборок;
- применение диалоговых методов формирования характерных элементов твёрдых тел (бобышек и отверстий, элементов по сечениям и траектории, скругления, фаски и т.д.), поверхностей (сшивка, обрезка, удлинение, скругление), массивов элементов и др.;
- автоматическое создание 2D-чертёжных видов по 3D-модели детали или сборки (с разрезами, сечениями, местными видами и т.п.);
- выпуск чертежей в соответствии с требованиями ЕСКД с автоматическим отображением размеров модели, простановкой справочных размеров, шероховатостей, допусков отклонения форм и т.п.;
- единая библиотека физических свойств материалов, текстур и штриховок;
- использование готовых библиотек (в том числе и по ГОСТ) стандартных изделий (англ. *Toolbox* - инструментальные средства), параметры которых собраны в несколько структурированных таблиц (болтов, гаек, шайб, прокатных профилей, подшипников, шестерней и т.д.), с возможностью пополнения пользователями новыми изделиями и др.

Успех внедрения *Solid Works* на предприятиях отечественной промышленности обеспечен интуитивно понятным русскоязычным интерфейсом, прекрасно продуманными обучающей и справочной подсистемами, возможностью создания электронной интерактивной конструкторской документации в соответствии со стандартами ЕСКД, поддержкой лёгкого импорта и экспорта чертежей в форматах других известных САПР.

Solid Works - мощное средство проектирования, предоставляющее проектировщику РЭС, сборок, проверки динамики поведения изделий. Библиотеки физических свойств материалов, текстур и штриховок, допусков и посадок, а также стандартных элементов (крепежа, типовых конструктивных элементов, стандартных деталей и узлов, элементов листовых деталей, профилей прокатного сортамента и т.п.) позволяют быстрее и легче чем когда-либо создавать трёхмерные модели деталей, сборочных единиц, генерировать чертежи.

В последнее время отчётливо обозначилась тенденция группирования в *Solid Works* кроме инструментов геометрического моделирования и расчётные программы. Действительно, модель объекта в среде *Solid Works* содержит как геометрическую информацию, так и информацию об электрических и физических свойствах материалов, из которых изготовлены эти объекты. Это даёт возможность, используя методы конечных элементов и конечных объёмов, а также целый ряд универсальных вычислительных процедур, выполнять расчёты механических, тепловых и электромагнитных полей.



Дополнительный универсальный модуль инженерного анализа *SolidWorks Simulation Professional* (ранее *COSMOSWorks*) [28] включает расчёты на прочность конструкций в упругой зоне (Рис. 6.2), постановку и решение контактных задач, расчёт сборок, определение собственных форм и частот колебаний, расчёт конструкции на устойчивость, усталостные расчёты, имитация падения, тепловые расчёты. В дополнение к *SolidWorks Simulation Professional* модуль *SolidWorks Simulation Premium* позволяет оптимизировать параметры модели, учитывать нелинейные свойства материалов и нелинейное нагружение, расчёт нелинейных контактных задач, проводить анализ усталостных напряжений и определение ресурса конструкций.

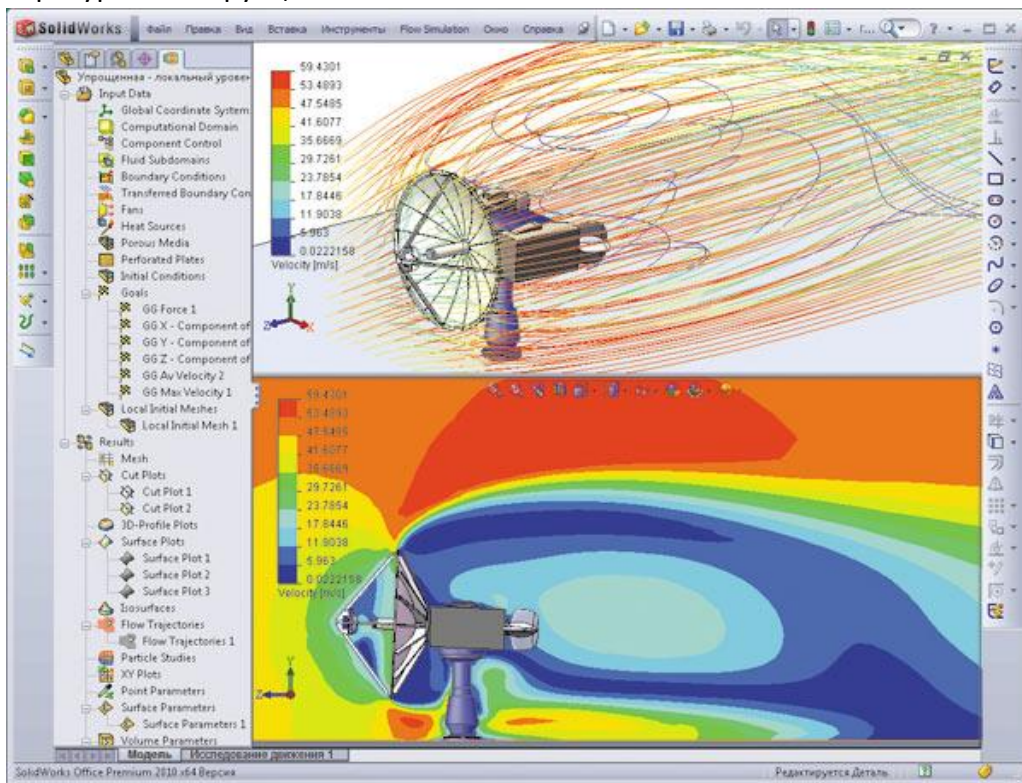


Рис. 6.2 - Анализ воздушного потока, обтекающего радиолокатор, с помощью *SolidWorks Simulation Professional*



Дополнительный модуль *SolidWorks Flow Simulation* [29] (ранее *COSMOSFloWorks*) предназначен для теплового расчёта электронных и других устройств (Рис. 6.3). Он включает расширенную базу данных по виртуальным вентиляторам, материалам электротехнического назначения и т.п.

С помощью модуля *SolidWorks Flow Simulation* возможно решение следующих задач:

- внутреннее течение и внешнего обтекания;
- теплопроводность и теплопередача;
- учёт сжимаемости;
- ламинарные и турбулентные потоки;
- учёт шероховатости стенки и др.

SOLIDWORKS
ELECTRICAL

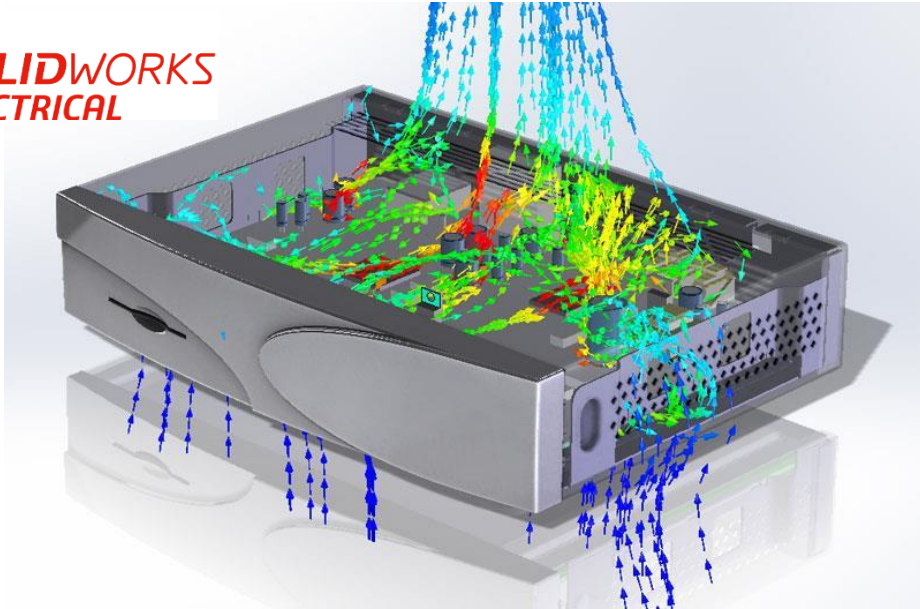


Рис. 6.3 – Моделирование тепловых потоков в блоке ПЭС
в *SolidWorks Flow Simulation*

Ещё один дополнительный модуль *SolidWorks Electrical* объединяет электрическую и механическую части проекта в единой среде проектирования, обеспечивая моделирование проводных соединений (Рис. 6.4) между контактами с использованием пополняемой библиотеки соединителей, проводов, многожильных кабелей, изоляционных трубок, экранирующих плетёнок и т.д.

Программа выдаёт подробную информацию о выполненных соединениях и использованных материалах, представляя её в виде таблиц, отчётов, и чертежей.

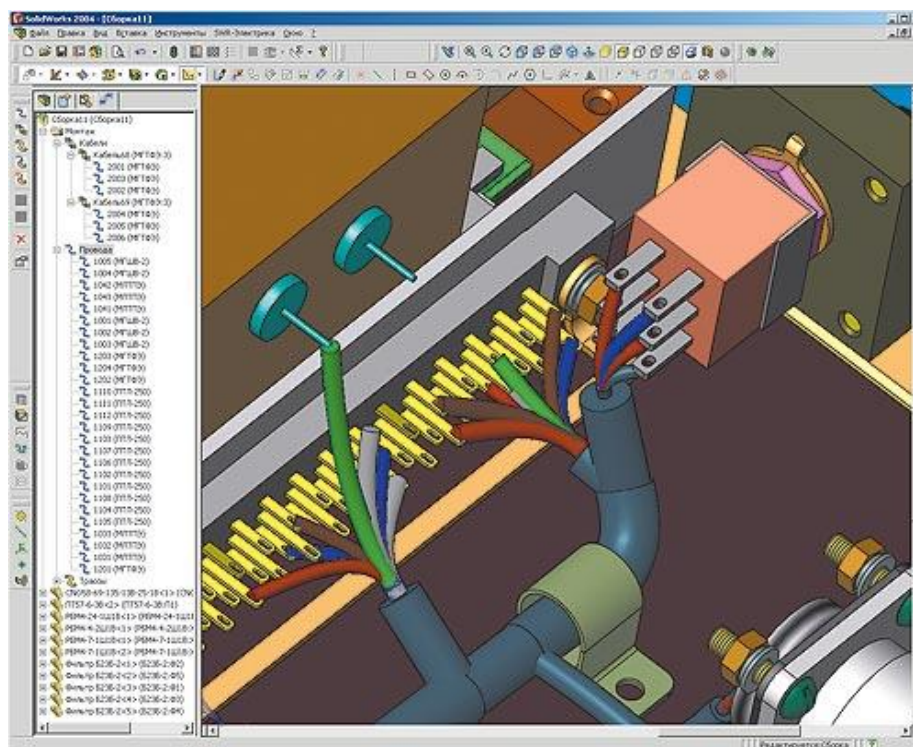


Рис. 6.4 – Проектирование жгутов в *SolidWorks Electrical*

6.1.2 «Компас» — отечественная 3D САПР, позволяющая оформлять конструкторскую документацию по стандартам ЕСКД



Российской компанией «[АСКОН](#)» [30] разработан «Компас» — семейство программ автоматизированного трёхмерного проектирования для различных отраслей с возможностями оформления проектной и конструкторской документации в полном соответствии со стандартами серии ЕСКД [24,30].

Система трёхмерного твердотельного моделирования «Компас» предназначена для создания трёхмерных ассоциативных моделей отдельных деталей и сборочных единиц, содержащих как оригинальные, так и стандартизованные конструктивные элементы. Параметрическая технология позволяет быстро получать модели типовых изделий на основе однажды спроектированного прототипа. Многочисленные сервисные функции облегчают решение вспомогательных задач проектирования и обслуживания производства. Система «Компас» позволяет автоматизировать широкий спектр проектно-конструкторских работ, легка в освоении, удобна в работе и при этом имеет стоимость, приемлемую для комплексного оснащения российских предприятий, в том числе средних и малых.

Как и *Solid Works*, *Компас* автоматически генерируют ассоциативные виды моделей (в том числе разрезы, сечения, местные разрезы, местные виды, виды по стрелке, виды с разрывом) (Рис. 6.5). Все они ассоциированы с моделью: изменения в модели приводят к изменению изображения на чертеже.

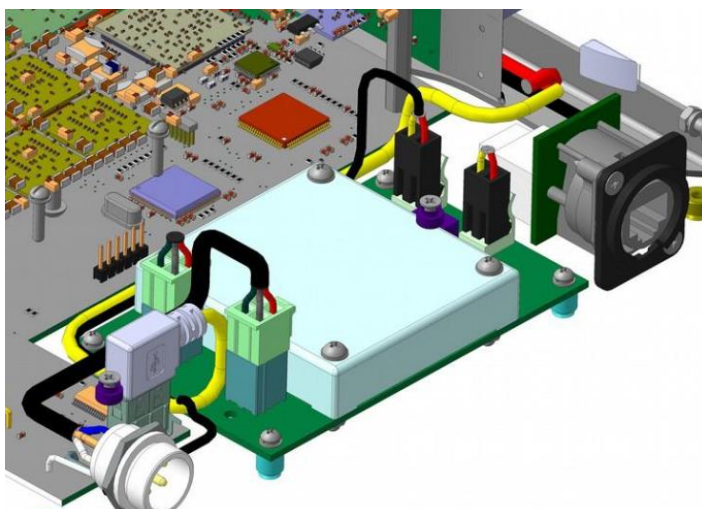


Рис. 6.5 - Проектирование РЭС в САПР *Компас*

Стандартные виды в «Компасе» автоматически строятся в проекционной связи. Данные в основной надписи чертежа (обозначение, наименование, масса) синхронизируются с данными из трёхмерной модели. Имеется возможность связи трёхмерных моделей и чертежей со спецификациями, то есть при «надлежащем» проектировании спецификация может быть получена автоматически. Кроме того, изменения в чертеже или модели будут передаваться в спецификацию, и наоборот.

6.1.3 Система трёхмерного твердотельного и поверхностного параметрического проектирования *Autodesk Inventor*



3D-САПР *Autodesk Inventor* [24] имеет в своём составе простой в использовании набор инструментов для машиностроительного проектирования, разработки электрических и трубопроводных систем, проектирования оснастки для литья пластмассовых изделий, получения и выпуска конструкторской документации в соответствии с ЕСКД, проведения расчётов и анализа. Динамическое электронное макетирование, реализованное в *Inventor*, помогает испытывать продукцию в действии ещё до изготовления опытного образца.

По своим возможностям САПР *Inventor* и *Solid Works* близки (Рис. 6.6). В основе обеих САПР лежит технология трёхмерного параметрического моделирования, то есть моделирования с использованием параметров элементов модели, изменяя которые, возможно просмотреть различные конструктивные схемы. В отличие от *Solid Works* в *Inventor* применяется и технология адаптивного моделирования, т.е. при изменении размера одного элемента модели меняются и сопряжённые с ним другие элементы модели. Это позволяет сконцентрироваться на функциональности сборки, а не на размерах составляющих её деталей. Тем не менее, пользователи отмечают, что у *Solid Works* более удобный интерфейс, а также более эффективные расчётно-аналитические модули.

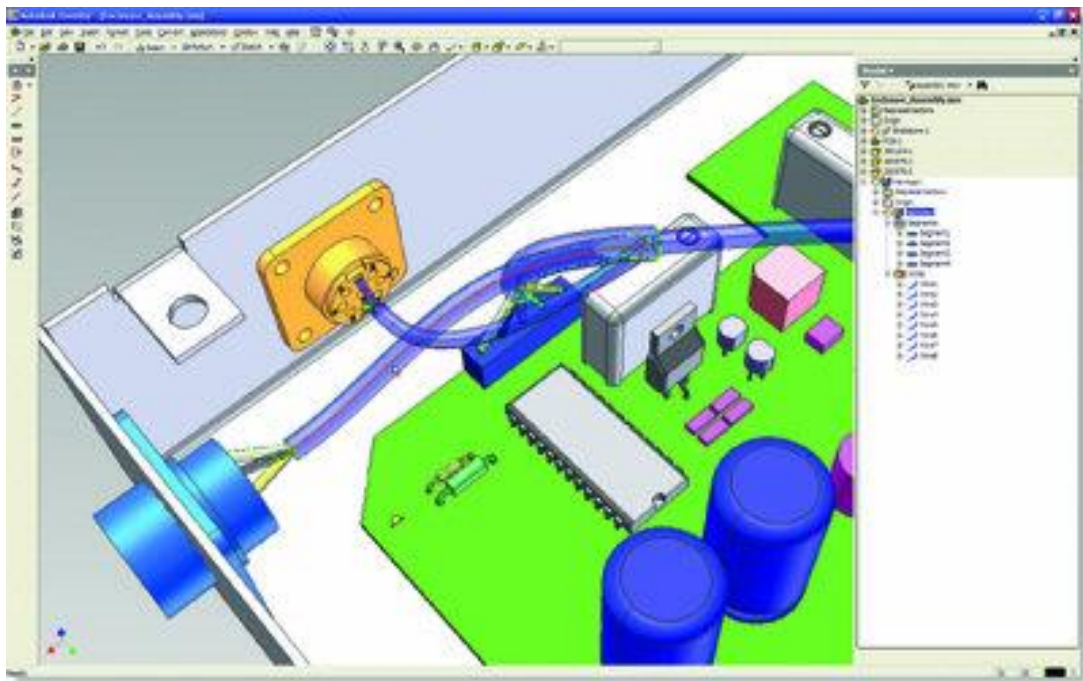


Рис. 6.6 – Автоматизированное 3D-проектирование кабелей, жгутового и проводного монтажа в среде *Autodesk Inventor*

6.1.4 САПР высокого уровня CATIA



Универсальная CAD/CAM/CAE система CATIA (*Computer Aided Three-dimensional Interactive Application*) - это полностью интегрированная система французской компании «[Dassault Systemes](http://www.dassault-systemes.com)», позволяющая обеспечить параллельное проведение конструкторско-производственного цикла крупных изделий [31]. САПР CATIA широко применяется в крупнейших российских машиностроительных предприятиях (Гражданские Самолёты Сухого, АВТОВАЗ, Камов и т.п.), а также в таких всемирно известных компаниях как *Boeing, Airbus, BMW, Mercedes, Toyota, Renault* и многих других для автоматизированного проектирования, подготовки производства, реинжиниринга (Рис. 6.7).

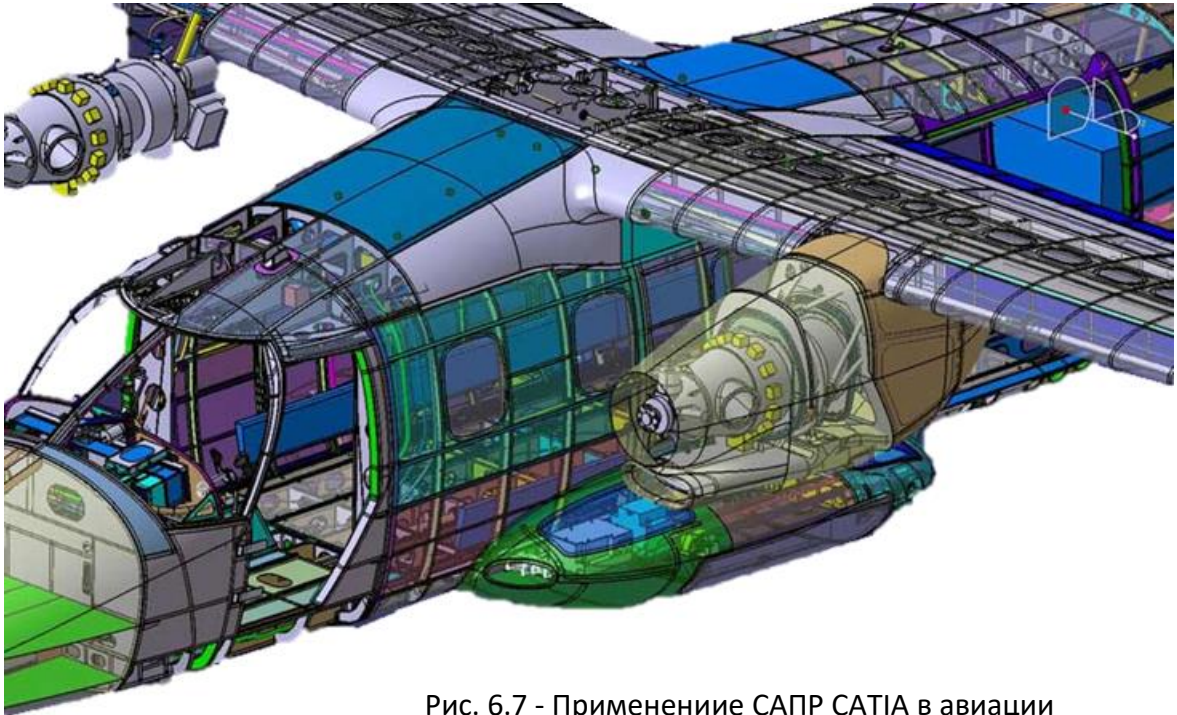


Рис. 6.7 - Применение САПР CATIA в авиации

В CATIA с учётом требований отечественных стандартов поддерживаются следующие функции:

- работа с цифровым макетом как едином источнике информации об изделии на всех этапах жизненного цикла;
- планирование, управление ресурсами, инспектирование и документирование проекта;
- создание сборок, тонкостенных и сварных конструкций, твердотельное моделирование и каркасное проектирование, а также создание поверхностей произвольной формы;
- описание всех механических и электрических связей между компонентами объекта;
- автоматический анализ геометрических и логических конфликтов сложных сборок;
- трассировку систем коммуникаций с соблюдением заданных ограничений;
- технологическую подготовку производства.

6.2 САПР проектирования печатных плат

6.2.1 САПР P-CAD

p-cad 2006

Среди российских разработчиков печатных плат огромную популярность приобрела мощная система автоматизированного проектирования печатных плат радиоэлектронных и вычислительных устройств P-CAD фирмы *Personal CAD Systems, Inc.* (позднее австралийской компании [Altium](#)) [32,33,34,35,36,37], дающий полное комплексное программное решение для проектирования печатных плат (Рис. 6.8). Программа способна выполнить весь цикл разработки печатных плат, интерактивное размещение элементов и автотрассировку проводников, поиск ошибок на любой стадии проекта, подготовку документации, проверку целостности всех сигналов, анализ перекрёстных искажений.

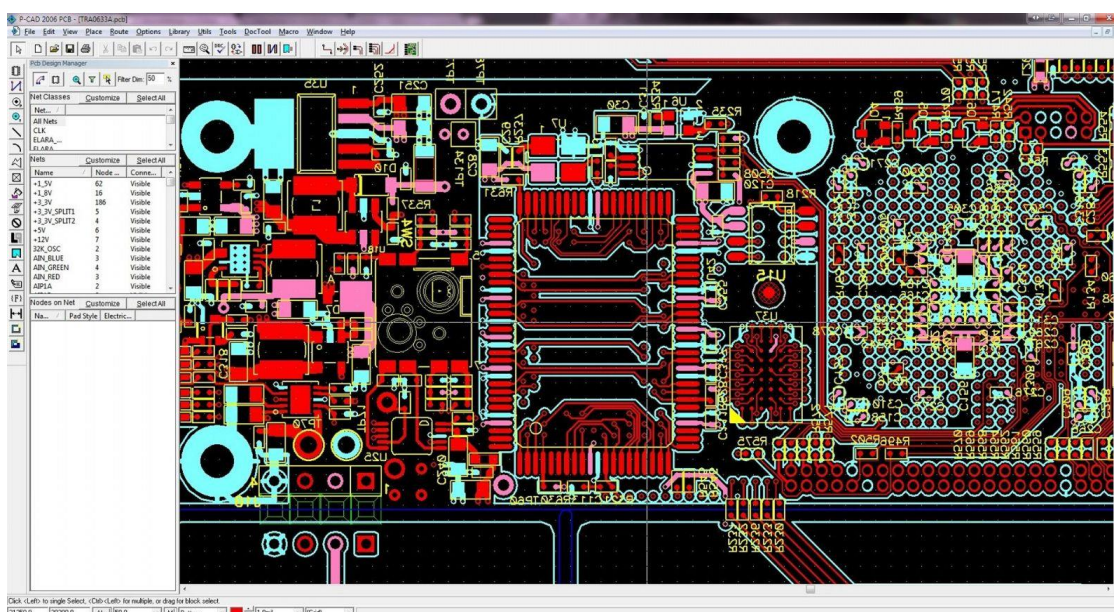


Рис. 6.8 - Проектирование печатных плат в P-CAD 2006

Программы пакета P-CAD осуществляют функции моделирования, проверяют соблюдение правил проектирования, создают список соединений для моделирования, автоматически размещают компоненты и трассируют печатную плату, а также создают документы для автоматизированных производственных систем. Пакет содержит взаимодействующие средства проектирования, удобную для пользователя оболочку и интеллектуальную базу данных, обширную интегрированную библиотеку электрорадиоэлементов, диалоговые редакторы, средства сопряжения с популярными средствами анализа. Пакет имеет открытую архитектуру, обеспечивает выдачу готовых документов для технологии монтажа и другую проектную документацию.

К сожалению, невозможность учёта высот двумерных моделей ЭРЭ (2D-моделей) в P-CAD затрудняет их размещение на плате и не позволяет просматривать готовые печатные платы в режиме 3D. Отсутствие программ конструкторских расчётов заставляет выполнять их вручную или во внешних программах. Отметим также слабую совместимость P-CAD с механическими САПР. При изменениях в файле трассировки они автоматически не отображаются в файле схемы.

6.2.2 САПР семейства *Altium Designer*

В 2008 году один из ведущих мировых разработчиков программного обеспечения для проектирования электронных средств (ЭС) фирма [Altium Limited](#) [38] заявила о прекращении поддержки и поставки весьма популярной в России САПР проектирования печатных плат (ПП) и печатных узлов (ПУ) РЭС *P-CAD*, и предложила разработчикам использовать для автоматизированного проектирования, отладки и выполнения документации более совершенную комплексную САПР радиоэлектронных средств - *Altium Designer* [39,40,41].

Altium Designer – это комплексная система, позволяющая осуществлять проектирование высокоскоростных электронных средств на уровне схемы или программного кода с последующей передачей информации проектировщику ПЛИС или печатной платы. В состав программного комплекса *Altium Designer* входят все необходимые инструменты для разработки, редактирования и отладки проектов на базе электрических схем и ПЛИС.

Отличительной особенностью программы является *проектная структура* и *сквозная целостность ведения разработки* на разных уровнях проектирования. Все изменения, внесённые на любом этапе разработки, могут быть мгновенно автоматически переданы на уровень ПЛИС или схемы и обратно.

Цифро-аналоговое моделирование учитывает практически все реальные параметры и предоставляет большое количество различных видов анализа, включая анализы переходных процессов, частотный, шумов, передаточных функций, Фурье, методом Monte-Carlo, при возможном изменении значений температуры.

В *Altium Designer* полностью поддерживаются все наработки в виде схем, плат и библиотек, разработанные в последних версиях *P-CAD*.

Библиотеки *Altium Designer* содержат более 90 тысяч готовых компонентов, у многих из которых имеются модели посадочных мест, **SPICE** и **IBIS**-модели, а также трёхмерные модели, причём имеется возможность импорта уже готовых библиотек отечественных и зарубежных электронных компонентов из *PCAD 200**. Любую из таких моделей можно также создать внутренними средствами *Altium Designer*.

В дополнение к современным средствам разработки, *Altium Designer* имеет широкие возможности импорта и экспорта сторонних систем проектирования и поддерживает практически все стандартные форматы выходных файлов (*Gerber*, *ODB++*, *DXF* и т. д.).

Отметим также интеграцию в *Altium Designer* систем **ECAD** и **MCAD**. Разработка печатных плат и узлов возможна в трёхмерном виде с возможностью импорта/экспорта информации *Altium Designer* в механические САПР (например, *Solid Works* и др.) и обратно в формате **STEP**. В *Altium Designer* поддерживается двунаправленная работа с механическими деталями и моделями компонентов, в том числе и из механических САПР.

В отличие от *P-CAD*, работа над всеми частями проекта в *Altium Designer* ведётся в единой управляющей оболочке *Design Explorer* (Рис. 6.9), что позволяет разработчику контролировать целостность проекта на всех этапах проектирования.

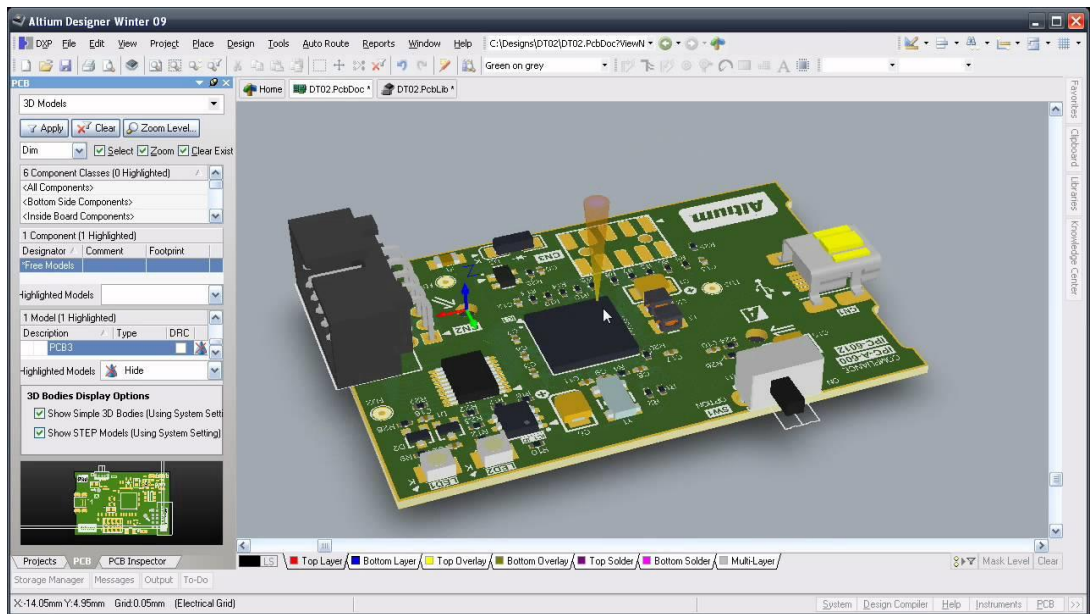


Рис. 6.9 - Проектирование печатных узлов в *Altium Designer*

Редактор печатных плат *Altium Designer* содержит мощные средства интерактивного размещения компонентов и трассировки проводников, что максимально упрощает процесс разработки электроники. В состав программы входит автоматический трассировщик *Situs*, использующий передовые алгоритмы трассировки печатных проводников.

В *Altium Designer* изменения, внесённые на любом этапе разработки, автоматически передаются на все связанные стадии проекта, а концепция *Live Design* (так называемое живое проектирование) позволяет завершить отлаживать ПЛИС-проекты на плате отладки *NanoBoard* (Рис. 6.10) уже на этапе создания принципиальной схемы. Контроль целостности проекта позволяет отслеживать изменения в частях проекта и синхронизировать их.

Altium Designer неизменно оказывает пользователю интерактивную помощь в работе с ней, предоставляя легко доступную справочную информацию и обеспечивая возможность подробного изучения возможностей системы. *Altium Designer* предоставляет динамичные и исчерпывающие учебные ресурсы, непосредственно встроенные в систему, при этом дополнительные материалы автоматически передаются при каждом обновлении системы *Altium Designer*. Этим обеспечивается постоянное обновление системы знаний и синхронизация с постоянно развивающимися методами и возможностями техники.



Рис. 6.10 - Макетная отладочная плата *NanoBoard 3000* для проектирования ПЛИС от компании *Altium*

6.2.3 САПР *Mentor Graphics*



Одной из наиболее прогрессивных САПР проектирования сложных современных высокотехнологичных и высокоскоростных печатных плат считается выпускаемый одним из мировых лидеров в области САПР электроники компанией *Mentor Graphics* (Рис. 6.11) пакет *Expedition PCB* (40% мирового и 50% европейского рынка САПР печатных плат) [42].

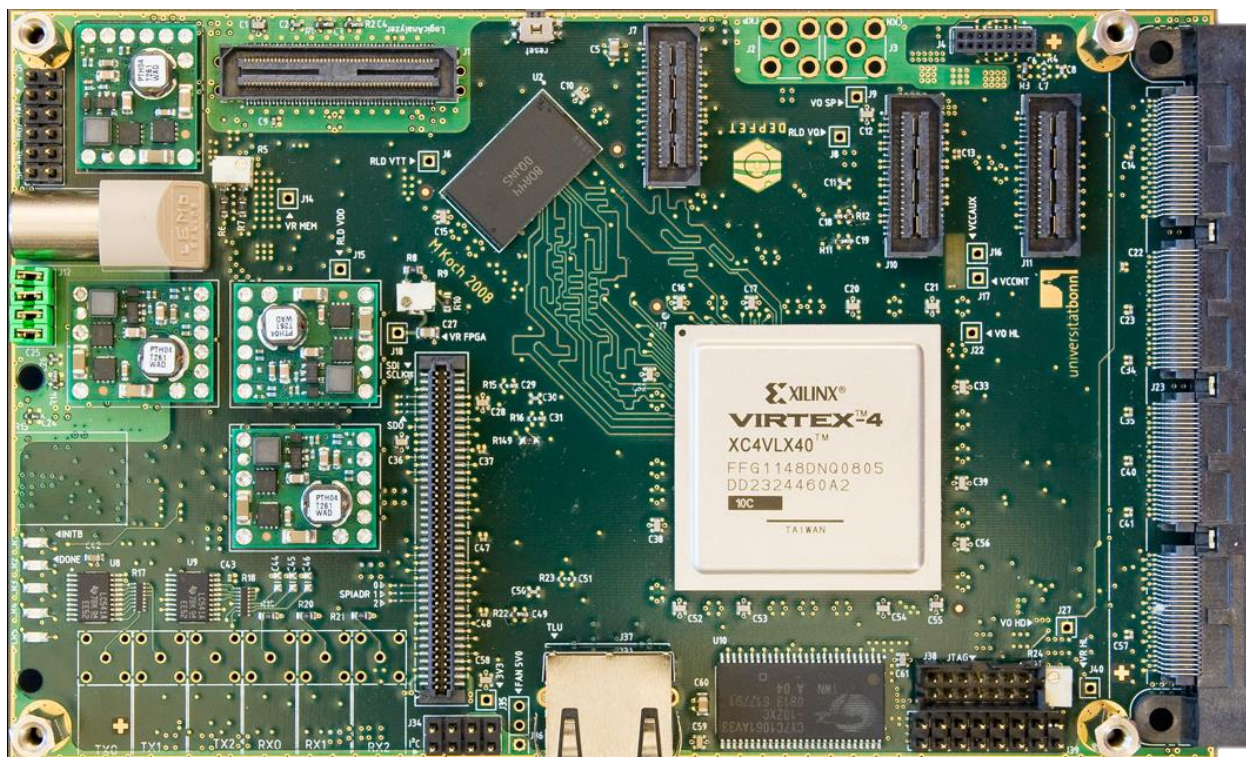


Рис. 6.11 - Проектирование печатных плат в *Mentor Graphics*

Маршрут *Expedition PCB*, основанный на использовании самых передовых технологий в области проектирования печатных плат и высокочастотного анализа, обеспечивает полный спектр возможностей:

- совместную работу инженеров-разработчиков с использованием локальных сетей и Интернета на любой стадии процесса проектирования;
- интеграцию с системой моделирования и анализа целостности сигналов, перекрёстных помех и электромагнитной совместимости;
- поддержку технологии высокоплотных межсоединений (*HDI*), скрытых микропереходов, встроенных пассивных компонентов;
- интеграцию с системой теплового моделирования;
- интеграцию с маршрутом проектирования *FPGA* (ПЛИС);
- поддержку технологии гибких и гибко-жестких печатных плат, современных многовыводных корпусов СБИС всех типов и т.п.

К сожалению, высокая стоимость САПР *Expedition PCB* не способствует её широкому распространению на российском рынке.

6.2.4 САПР печатных плат DipTrace



DipTrace - это многофункциональная САПР компании «Новарм» [43] по разработке электронных печатных плат и схемотехнической документации для сквозных проектов любой сложности - от идеи до готового устройства (Рис. 6.15).

К достоинству DipTrace следует отнести простой и понятный русскоязычный интерфейс, позволяющий быстро осваивать и эффективно использовать программу.

Редактор **DipTrace 3.2 Schematic Capture** позволяет разрабатывать многослойные и многоуровневые иерархические схемы электрические принципиальные. Выводы можно соединять визуально с помощью соединений и шин, или же логически, без соединений, используя сетевые и порты шин, либо просто по имени. Проверка допустимости соединений и верификация иерархии схем помогают избежать ошибок при создании проекта и создать комфортную рабочую среду. Она имеет множество настроек и сообщает разработчику если на схеме есть короткие замыкания, накладывающиеся выводы, сети с одним выводом и проверяет совместимость типов выводов.

Редактор плат **PCB Layout** осуществляет ручную и автоматическую трассировку разводку плат (Рис. 6.13). Ручная трассировка даёт возможность подсветки всех выводов сети и удаление в автоматическом режиме всех разведённых связей. Автотрассировка выполняется при помощи встроенного мощного современного сеточного трассировщика *Simple Router* с автоматическим позиционированием компонентов, возможностью копирования трассировки между иерархическими блоками и всеми необходимыми функциями для



Рис. 6.12 - Подсистемы DipTrace

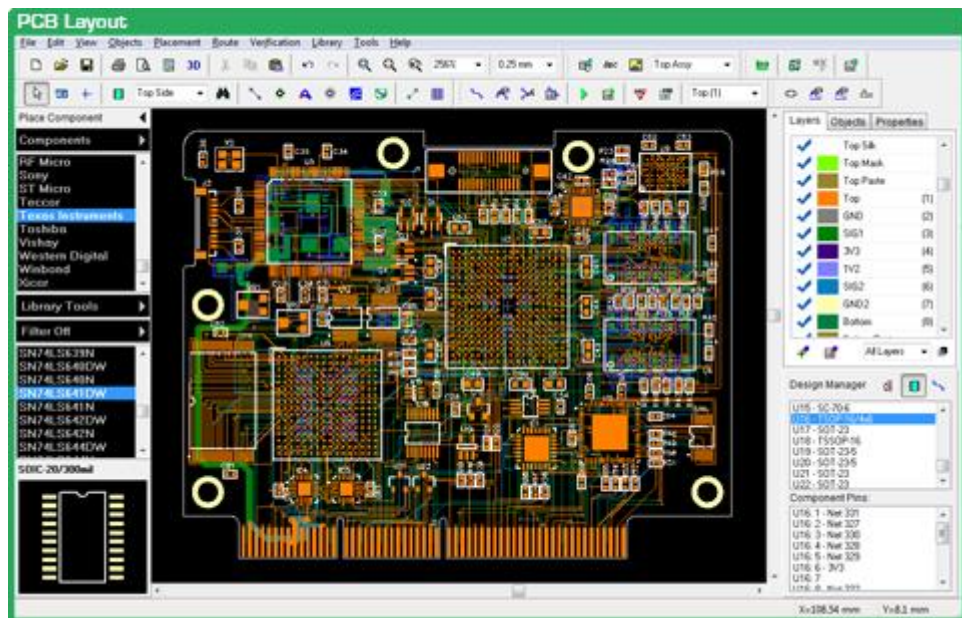


Рис. 6.13 – Работа в редакторе PCB Layout DipTrace

быстрой и продуктивной работы в том числе с высокоскоростными и дифференциальными сигналами.

Стандартный пакет библиотек *DipTrace* включает более 140 тыс. компонентов, около 15200 корпусов и поставляется вместе с программой. Редактор корпусов печатной платы *Pattern Editor* позволяет создавать свои библиотеки с недостающими элементами. Редактор компонентов *Component Editor* позволяет рисовать условные графические обозначения элементов схем и связывать их с корпусами. В этих редакторах имеются множество стандартных и настраиваемых шаблонов, функции массового переименования выводов, нумерации контактных площадок и инструменты по работе с шинами, которые минимизируют общие затраты времени на создание библиотек. В программе ComEdit можно воспользоваться как уже готовыми шаблонами (в комплекте с программой идёт библиотека корпусов), так и инструментами послойного рисования.

Редактор *PCB Layout* позволяет просматривать и экспортировать трёхмерную модель платы со всеми установленными на ней компонентами на любом этапе проектирования (Рис. 6.14), что даёт возможность выявить недостатки компоновки до передачи в производство. Модель можно в реальном времени вращать и масштабировать во всех плоскостях, а также менять цвет текстолита, дорожек/заливок, масок, шелкографии и фона. С *DipTrace* поставляются более 7.5 тыс. 3D-моделей корпусов

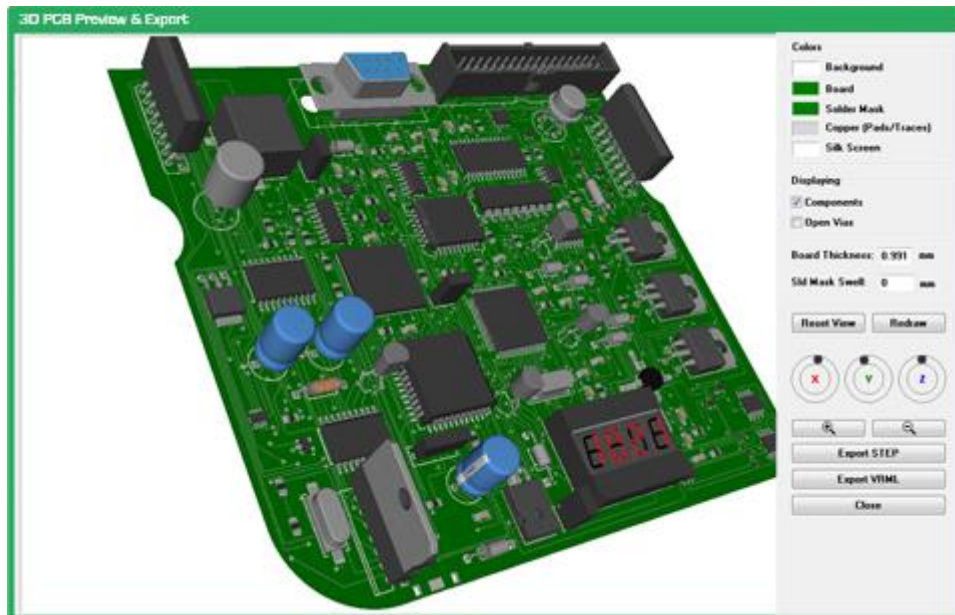


Рис. 6.14 – 3D просмотр в *PCB Layout DipTrace*

Возможен экспорт модели платы в форматы STEP и VRML 2.0 для механических САПР. Вся работа сопровождается подсветкой редактируемых и зависящих от них элементов, позволяющих наглядно оценивать ситуацию. Логическая структура принципиальной схемы или платы формируется сразу при построении и изменение одного элемента отражается на зависящих от него.

Имеется возможность импорта и экспорта данных из многих электронных САПР - PCAD, OrCAD, PADS и других.

В *DipTrace* можно получить все необходимые для производства файлы (Gerber RS-274X, Excellon N/C Drill, DXF). Для Gerber существует возможность разметки отверстий.

Урезанная бесплатная некоммерческая версия САПР DipTrace предлагается радиолюбителям. В этой версии не разрешается проектировать многослойные печатные платы. И ещё ограничение - не более 500 выводов на плате.

6.2.5 САПР PADS PowerPCB



Более дешёвый чем Expedition PCB продукт компании Mentor Graphics - система PADS PowerPCB [44], располагает великолепным автотрассировщиком *BlaseRouter*, поддерживающим все нужные при трассировке высокочастотных плат функции. Пакет имеет оригинальные модули предтопологического (*HyperLinks LineSim*) и посттопологического (*HyperLinks BoardSim*) моделирования, тесно взаимодействующих с системой контроля ограничений (Рис. 6.15).

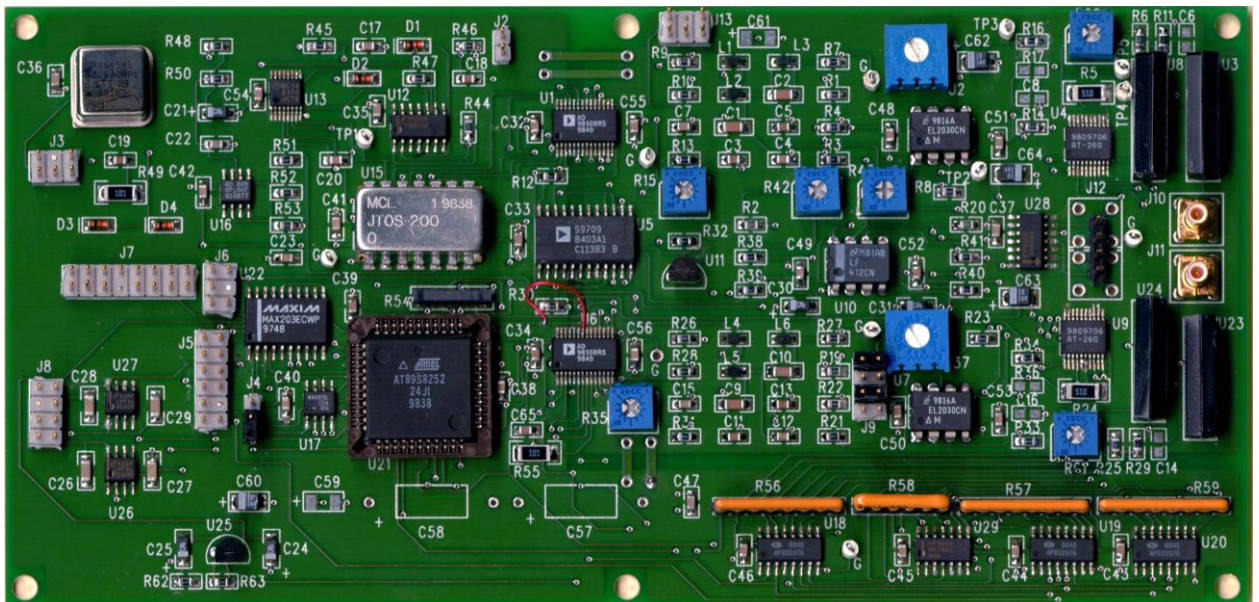


Рис. 6.15 - Проектирование печатных плат в PADS PowerPCB

6.2.6 САПР электронных устройств Delta Design



Среди перспективных САПР печатного монтажа следует отметить *Delta Design* российской компании Эремекс [45,46]. Это первая современная отечественная САПР, которая в комплексе с САПР КОМПАС-3D может реализовать на предприятии сквозной цикл проектирования радиоэлектронных устройств:

- формирование целостной базы данных по ЭРЭ в транзакционной СУБД и поддержание её в актуальном состоянии;
- разработка схем электрических принципиальных с помощью интеллектуального схемотехнического редактора, обеспечивающего на основе выбираемых стандартов проектирования автоматическое прокладывание цепей схемы по оптимальному маршруту, создание портов на концах цепей, перемещения компонентов, проводников, портов и шин с сохранением подключений и др. Дружеский интерфейс схемотехнического редактора уменьшает число ошибок при построении схемы, препятствуя совершению пользователем некорректных действий;

- проведение точного и быстрого полнофункционального SPICE-моделирования аналоговых и цифровых радиоэлектронных схем на основе модулей *SimOne* и *Simtera. Delta Design* содержит как встроенные SPICE-модели компонентов, так и базу готовых моделей реальных схемных компонентов обширную (более 30 000 шт.);
- единый редактор правил и ограничений для всех этапов проектирования - от создания УГО и посадочных мест компонентов до выпуска управляющих программ для технологического оборудования;
- разработка конструкции печатных плат в РСВ-редакторе, настройку свойств слоёв печатных плат, непрерывный контроль правил проектирования;
- размещение компонентов и проведение полуавтоматической и автоматической трассировки одиночных проводников и дифференциальных пар двухсторонних и многослойных печатных плат с помощью уникального топологического трассировщика **TopoR (Topological Router)** (Рис. 6.16);
- выпуск в соответствии с российскими стандартами конструкторской и производственной документации, в том числе и для автоматизированных производственных линий;

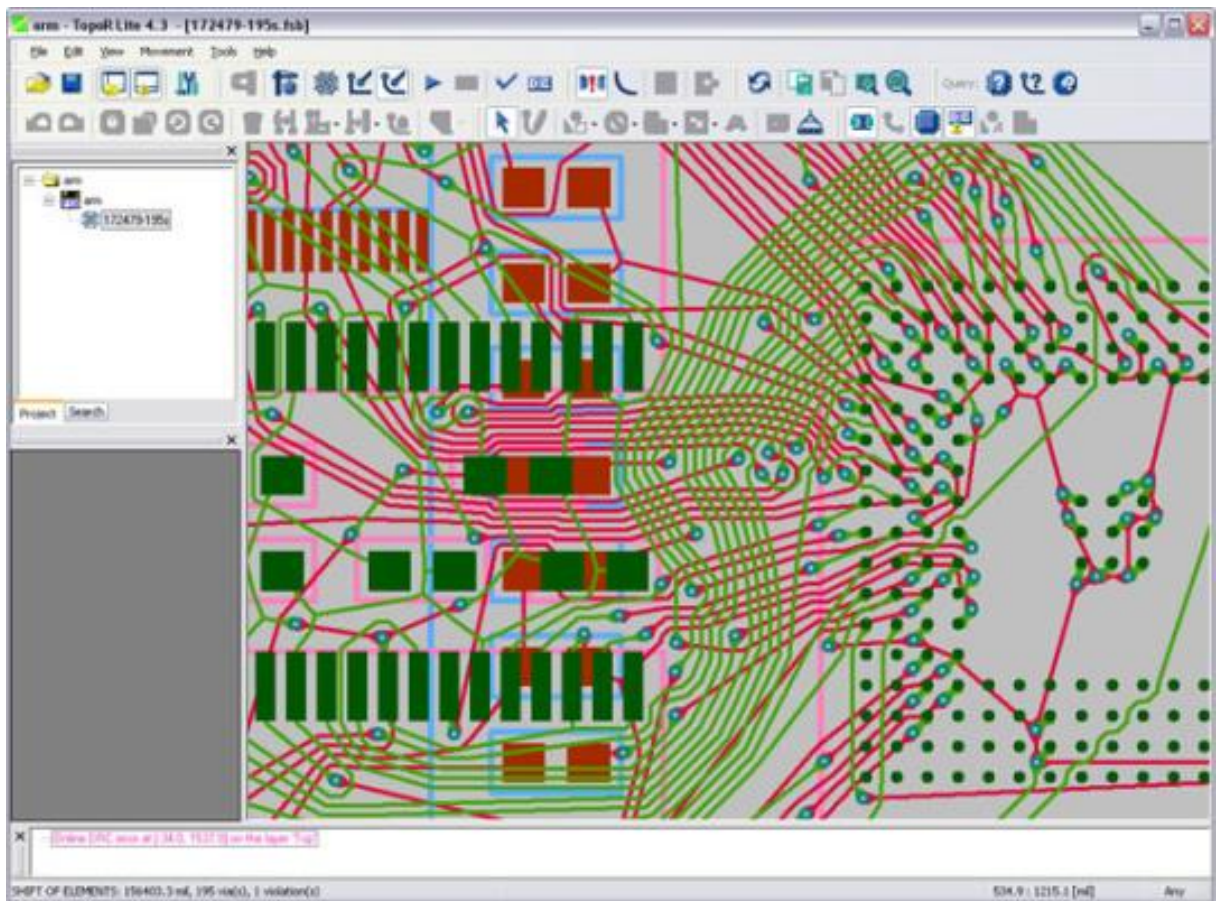


Рис. 6.16 - Проектирование ПП с помощью топологического трассировщика *TopoR*

- подготовка данных для составления перечнякупаемых изделий и материалов, необходимых для реализации проекта.

Метод гибкой трассировки, реализованный в *TopoR* отличается от других методов отсутствием жёсткой фиксации каждой из прокладываемых трасс, создающей часто совершенно необоснованные препятствия для других, ещё не проложенных трасс, обеспечивает

существенное снижение протяжённости параллельных трасс и уменьшает уровень перекрёстных электромагнитных помех. Автоматическая топологическая трассировка соединений выполняется в произвольных направлениях, не ограничиваясь углами 90° и 45°, и может выполняться ломаными линиями или даже дугами, что обеспечивает более экономичное использование коммутационного пространства. Уникальный алгоритм *TopoR* существенно уменьшает длину проводников и занимаемую ими площадь на платах, а также количество межслойных переходов при автотрассировке. Эффективность автотрассировки превосходит результаты аналогов.

Delta Design отлично взаимодействует с другими САПР, среди которых *PCAD 2000-2006*, *Altium Designer* и другие. К сожалению, пока поддерживает лишь 2D-проектирование.

6.2.7 САПР OrCAD/Allegro



OrCAD/Allegro — мощный пакет высокопроизводительных компьютерных программ компании [Cadence Design Systems](#) [47], предназначенный для создания электронных версий печатных плат для производства печатных плат, а также для производства электронных схем и их моделирования.

В составе *OrCAD/Allegro* следующие основные модули:

Capture — редактор принципиальных схем, обладающий широкими возможностями и полной интеграцией с системой аналого-цифрового моделирования *OrCAD PSpice A/D* — эталоном среди подобных систем. *OrCAD Capture* содержит [готовые библиотеки](#), в состав которых входят 80 тысяч компонентов. Порядка 17 тысяч компонентов имеют готовые *PSpice* модели;

PSpice Analog Digital — пакет аналого-цифрового моделирования;

PSpice Advanced Analysis — пакет параметрической оптимизации;

Capture CIS Option — менеджер библиотек Active Parts;

OrCAD PCB Editor — редактор топологий печатных плат, позволяющий использовать на плате полные 3D-модели компонентов в формате STEP;

SPECCTRA for OrCAD (Allegro PCB Router) — программа автоматической и интерактивной трассировки, использующая мощный бессеточный алгоритм, позволяющий эффективно использовать пространство для прокладки трасс (Рис. 6.17).

Signal Explorer — модуль анализа целостности сигналов и перекрёстных искажений.

Программный пакет *OrCAD* имеет все необходимое для выполнения различных этапов процесса разработки: входное проектирование, функциональное моделирование, синтез, размещение, трассировка, моделирование задержек, генерация элемента. Физическое проектирование начинается с выбора библиотечного и технологического базиса. В *OrCAD Capture* есть возможность создать проект в схемотехнической форме из уже готовых компонентов, а также в VHDL- или *Verilog*-моделях. На этапе функционального моделирования на входы проекта посылаются тестовые сигналы, полученные выходные данные

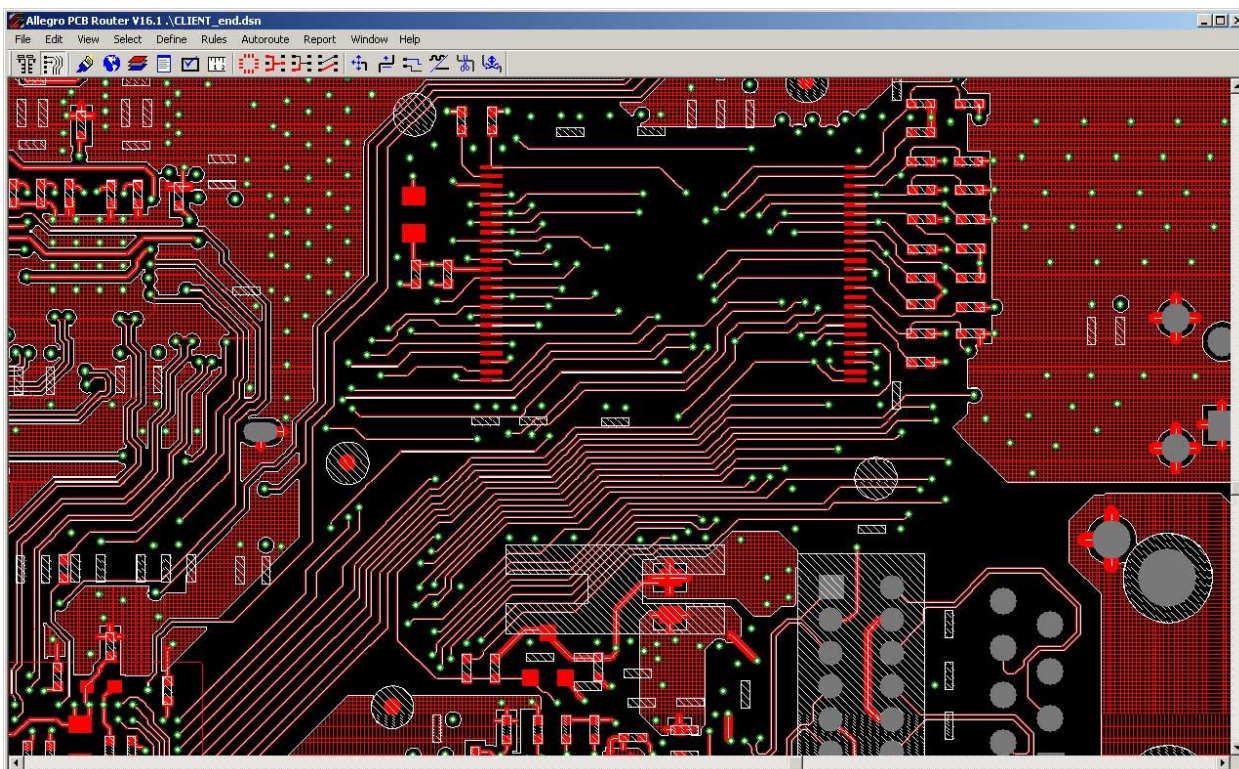


Рис. 6.17 - Автоматическая прокладка соединений автотрассировщиком SPECTRA можно сравнить с ожидаемыми результатами. Моделирование задержек позволяет определить задержки распространения сигналов и проверить, что временные характеристики микросхем не меняют логику проекта.

6.3 САПР моделирования режимов работы РЭС

6.3.1 «АСОНИКА» - автоматизированная система обеспечения надёжности и качества РЭС



Для анализа и обеспечения стойкости РЭС к комплексным тепловым, механическим, электромагнитным воздействиям и автоматизации документооборота при проектировании целесообразно применять отечественную автоматизированную систему обеспечения надёжности и качества аппаратуры АСОНИКА [48]. В состав комплекса АСОНИКА входят 18 подсистем, связанных с моделированием аэродинамических, тепловых, механических воздействий на РЭС, позволяющие заменить испытания компьютерным моделированием на внешние механические, тепловые, электромагнитные и другие воздействия ещё до изготовления.

При разработке современных РЭС с помощью системы АСОНИКА решаются следующие основные проблемы:

- за счёт комплексного моделирования разнородных физических процессов на ранних этапах проектирования обеспечивается предотвращение возможных отказов при эксплуатации;

- обеспечение безопасности человека за счёт комплексного автоматизированного анализа систем управления движущихся объектов на основе созданной электронной модели при всех видах внешних дестабилизирующих факторах, в том числе в критических режимах;

- сокращение сроков и затрат на проектирование за счёт доступности разработчику аппаратуры предлагаемых программных средств и адекватности результатов моделирования;

- автоматизация документооборота и создание электронной модели РЭС за счёт интеграции предлагаемых программных средств в рамках PDM-системы хранения и управления инженерными данными и жизненным циклом аппаратуры.

Так подсистема АСОНИКА-ТМ позволяет проводить комплексный анализ конструкций печатных узлов РЭС:

- стационарных и нестационарных тепловых режимов как при нормальном, так и при пониженном давлении(Рис. 6.18);

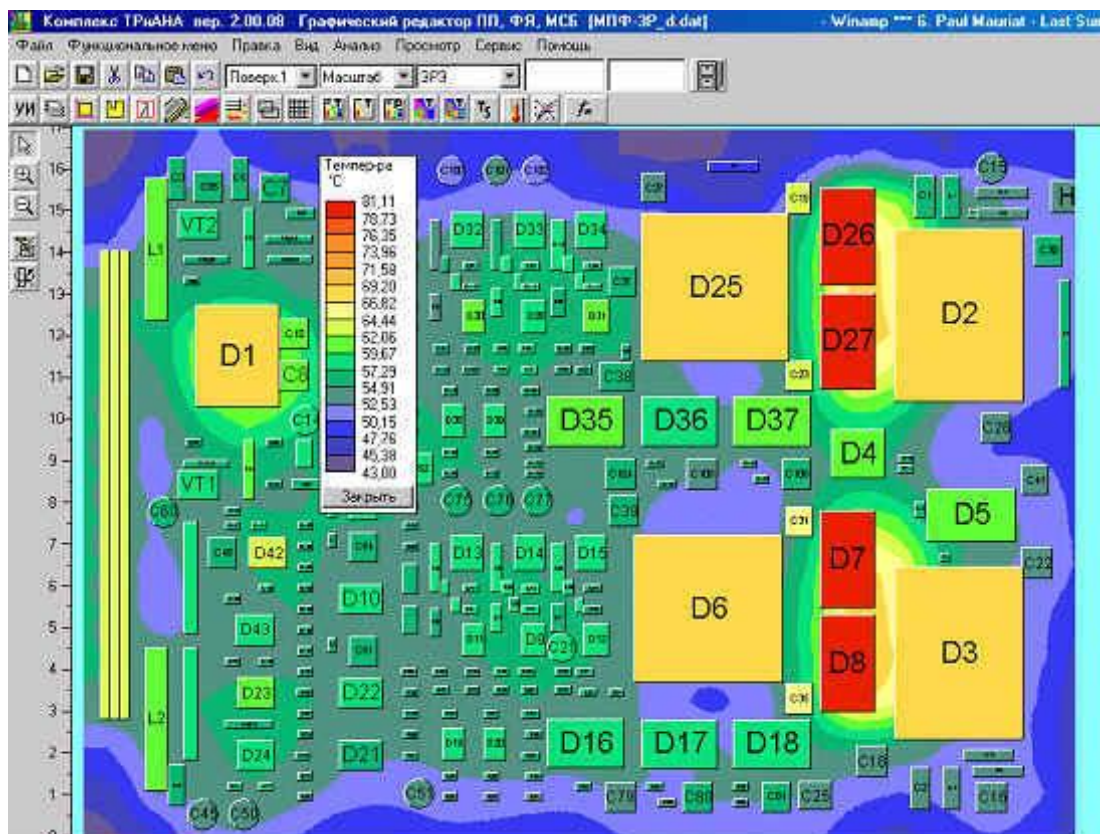


Рис. 6.18 – Моделирование стационарных и нестационарных тепловых процессов в РЭС с помощью программного комплекса *TRuANA (АСОНИКА-Т)*

- анализ механических воздействий (разных вибраций, одиночных и многократных ударов, линейных ускорений и акустического шума).

Имеются конвертеры с известными САПР проектирования печатных плат: *PCAD, Mentor Graphics, Altium Designer, OrCAD*. При конвертировании автоматически считываются координаты расположения всех ЭРЭ на плате и геометрия самого печатного узла.

АСОНИКА-ТМ включает в себя базу данных со справочными геометрическими, теплофизическими, физико-механическими и усталостными параметрами ЭРЭ и конструкционных материалов. Подсистема позволяет анализировать как конечно-разностные, так и конечно-элементные модели печатных узлов и печатных плат.

Результаты анализа конструкций печатных узлов могут быть представлены в виде:

- амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) или амплитудно-временной характеристики (АВХ) в зависимости от типа механического воздействия на конкретные точки и узлы конструкции, а также отдельные ЭРЭ;
- зависимостей температур от времени в контрольных точках конструкции, а также на отдельных ЭРЭ при нестационарном тепловом режиме;
- полей механических (прогибов, перемещений, ускорений, напряжений) и тепловых (температур) характеристик при заданном значении времени или частоты;
- деформации конструкции печатного узла;
- карт механических и тепловых режимов ЭРЭ с указанием коэффициентов нагрузки и перегрузок по ускорениям и температурам ЭРЭ, если таковые имеются, на основе которых может быть принято проектное решение.

6.3.2 «ANSYS» - универсальная система конечно-элементного анализа



Для выполнения оперативного высокоточного моделирования электромагнитных полей, теплообмена и потоков воздуха в компьютерах, телекоммуникационном оборудовании и других РЭС, применяемых в авиационной, космической, автомобильной, бытовой электронике до их изготовления в подобных случаях целесообразно использовать большую САПР ANSYS [49,50].

Увеличение плотности компоновки ЭРЭ создаёт предпосылки для перегрева электронных компонентов (Рис. 6.19), ухудшает рабочие характеристики и снижает надёжность РЭС в целом. Это вынуждает особенно скрупулёзно подходить к проектированию таких печатных плат и использовать высокоточное технологическое оборудование на производ-

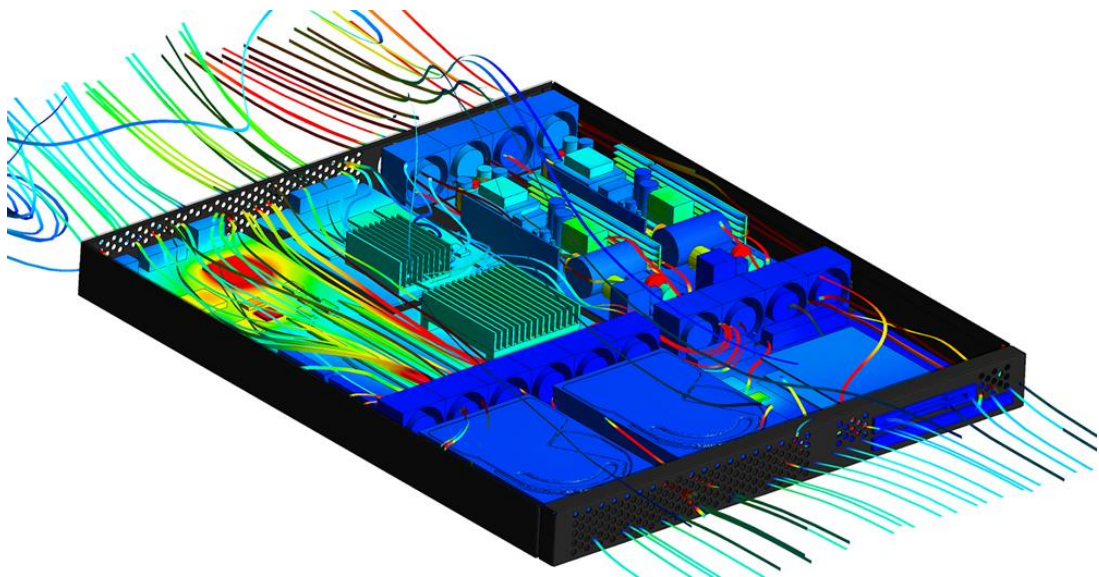


Рис. 6.19 – Моделирование воздушных и тепловых потоков в блоке РЭС с помощью ANSYS

стве. Необходимо значительно точнее учитывать распределение тепловых полей на печатной плате, так как безвыводные компоненты и материал печатных плат имеют заметно отличающиеся коэффициенты теплового расширения и связаны более жёстко. И если РЭС эксплуатируется в экстремальных условиях с большими перепадами температур (например, космические аппараты), то за счёт разных теплоёмкостей и теплопроводностей элементов рисунка возникают механические напряжения, приводящие к разрушению печатных плат.

Добавим, что ANSYS также широко применяется для автоматизированных инженерных расчётов линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твёрдого тела и механики конструкций (включая нестационарные геометрически и физически нелинейные задачи контактного взаимодействия элементов конструкций), задач механики жидкости и газа, теплопередачи и теплообмена, электродинамики, акустики, а также механики связанных полей.

6.3.3 «NI AWR Design Environment» - система проектирования высокочастотных (ВЧ) и сверхвысокочастотных (СВЧ) РЭС



Ведущим разработчиком передовых программных продуктов, предназначенных для автоматизации проектирования высокочастотных электронных устройств, корпорацией **Applied Wave Research (AWR)** [51], разработана единая среда проектирования радиоэлектронных средств *NI AWR Design Environment* (**NI** от англ. **National Instruments** - Национальные инструменты, AWR среда разработки).

Среда разработки *NI AWR Design Environment* объединяет три мощных инструмента для проектирования ВЧ и СВЧ, аналоговых или интегрированных систем: *Visual System Simulator (VSS)*, *Microwave Office (MWO)* и *Analog Office (AO)*.

AWR Design Environment позволяет совмещать вместе в едином представлении три уровня проектирования: системные параметры каналов распространения сигналов, схемотехнику и конструкции всех видов высокочастотных и сверхвысокочастотных устройств - компонентов систем радиосвязи, антенн, электронных приборов, мобильных радиосистем, телекоммуникационного оборудования радиочастотных и СВЧ устройств, начиная от сложных СВЧ сборок и кончая интегральными СВЧ микросхемами (Рис. 6.20).



Рис. 6.20 - Программное обеспечение NI AWR

VSS позволяет осуществлять сквозное проектирование систем связи (в том числе разрабатывать и анализировать системы связи *end-to-end*¹), оборонные и аэрокосмические системы и др. Возможно создание систем, включающих модулированные сигналы, схемы кодирования, блоки каналов и измерения параметров производительности на системном уровне. В VSS можно проводить симуляции при помощи передатчиков и приёмников с predetermined профилем, или же построить специализированные приёмники и передатчики из базовых блоков.

Microwave Office (микроволновый офис) [52] осуществляет проектирование ВЧ/СВЧ компонентов (Рис. 6.21), а **Analog Office** – проектирование аналоговых и ВЧ интегральных схем [53].

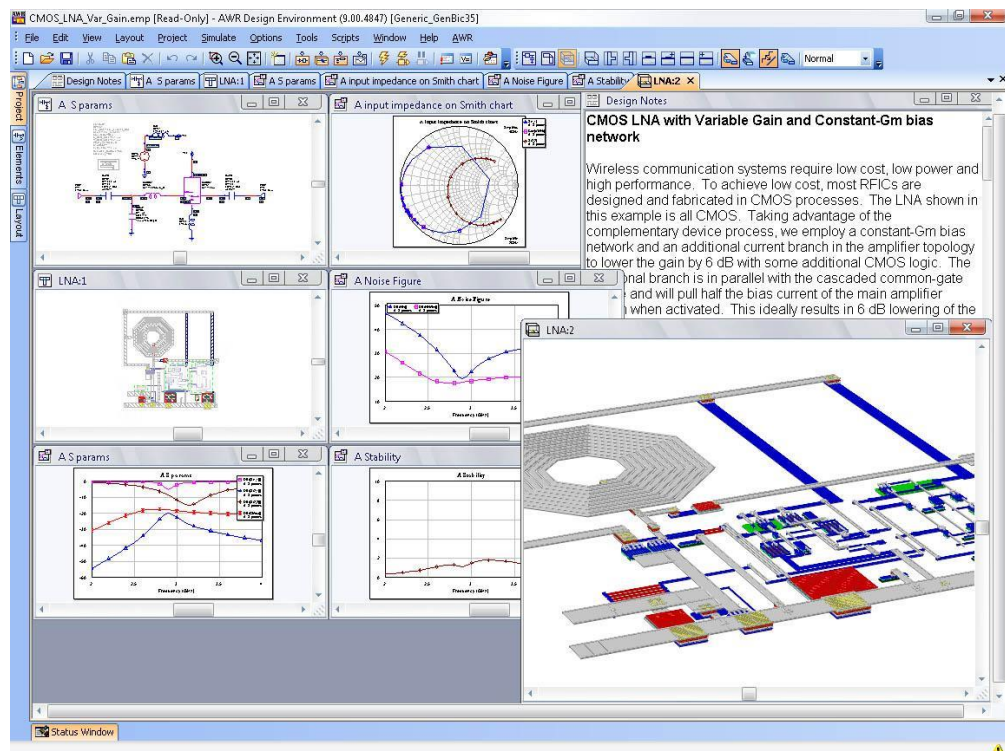


Рис. 6.21 - Моделирование СВЧ-устройств с помощью *Microwave Office*

Эти инструменты дают возможность разработчику синтезировать и проектировать сложные схемы высокочастотных электронных устройств, начиная с эскизного проекта и заканчивая готовой конструкцией с заданными параметрами и топологией печатной платы, без необходимости моделирования на макете. Имеющаяся обширная база современных электронных компонентов и электромагнитных структур даёт возможность моделировать происходящие в них процессы в режиме реального времени и вслед за тем синтезировать топологию широкополосных и резонансных усилителей, фильтров, генераторов, смесителей, модуляторов и демодуляторов, фазовращателей, умножителей частоты и других узлов ВЧ и СВЧ радиоэлектронной аппаратуры.

¹ **End-to-end encryption** — способ передачи данных, в котором только пользователи, участвующие в общении, имеют доступ к сообщениям. Использование сквозного шифрования не позволяет получить доступ к криптографическим ключам со стороны третьих лиц.

Одной из особенностей *программного обеспечения* является возможность изменения параметров отдельных компонентов перемещением движков на интерфейсе, с одновременной оценкой нескольких параметров исследуемой схемы на графиках, что полезно при проектировании многосвязных фильтров, смесителей и прочих непростых в проектировании и настройке узлов и цепей ВЧ-СВЧ техники. Используемые методы расчёта схем опираются на фундаментальные знания теории электромагнитного поля, теории радиоэлектронных цепей, на разделы устойчивости усилителей и генераторов, а также других устройств.

7 Список литературы

1. Государственная Дума РФ. О техническом регулировании. Федеральный закон № 184-ФЗ от 27 декабря 2002 г. URL: <http://www.norm-load.ru/SNiP/Data1/10/10844/index.htm>
2. ГОСТ 2.001—2013. Единая система конструкторской документации. Общие положения. - М.: Стандартиформ, 2014. - 6 с.
3. ГОСТ 3.1001-81. Единая система технологической документации. Общие положения. - М.: Стандартиформ, 1983. - 6 с.
4. ГОСТ 19.001-77. Единая система программной документации. Общие положения. - М.: Стандартиформ, 2010. - 6 с.
5. ГОСТ 3.1001-81. Единая система технологической документации. Общие положения. - М.: Госстандарт СССР, 2003. - 8 с.
6. ОС ТУСУР 01-2013 (СТО 02069326.1.01-2013). Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления. - Томск: ТУСУР, 2013. – 57 с.
7. ГОСТ Р 52003-2003. Уровни разукрупнения радиоэлектронных средств. Термины и определения. - М.: Стандартиформ, 2003. - 7 с.
8. Муромцев Ю.Л., Муромцев Д.Ю., Тюрин И.В. и др. Информационные технологии проектирования радиоэлектронных средств: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. - М.: Издательский центр «Академия», 2010. - 384 с.
9. Головицына М.В. Проектирование радиоэлектронных средств на основе современных информационных технологий: учебное пособие / М.В. Головицына. - М.: Интернет-Университет Информационных Технологий: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. - 503 с.
10. Алексеев О.В., Головков.А.А., Пивоваров И.Ю. и др. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств: Учеб. пособие для вузов / Под ред. О.В. Алексеева. — М.: Высш. шк, 2000.— 479 с.
11. Малюх В.Н. Введение в современные САПР: Курс лекций. - М.: ДМК Пресс, 2010. - 192 с.

- 12 ГОСТ Р ИСО 10303-1-99. Системы автоматизации производства и их интеграция. . Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 1. Общие представления и основополагающие принципы. – М.: Госстандарт России, 2007. - 16 с.
- 13 П.И. Овсицер, И.И. Лившиц, А. К. Орчинский и др. Компоновка и конструкции . микроэлектронной аппаратуры: Справочное пособие; Под ред. Б.Ф. Высоцкого, В.Б. Пестрякова, О.А. Пятлина. - М.: Радио и связь, 1982. - 208 с.
- 14 Козлов В.Г., Бацула А.П., Кобрин Ю.П. Основы проектирования электронных средств. . Общие вопросы проектирования. Учеб. пособие для студентов специальности 210201 – «Проектирование и технология радиоэлектронных средств». - Томск: ТУСУР, 2005. - 150 с.
- 15 Варламов, Р.Г. и др.. Справочник конструктора РЭА: Общие принципы конструирования. . — М.: Сов. радио, 1980. — 480 с.
- 16 Гелль П.П., Иванов-Осипович Н.К. Конструирование и микроминиатюризация РЭА. - Л.: Энергоатомиздат, 1984. - 536 с.
- 17 К.И. Билибин, А.И. Власов, Л.В. Журавлева и др.. Конструкторско-технологическое . проектирование электронной аппаратуры: Учебник для вузов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. — 528 с.
- 18 Каленкович Н.И. Радиоэлектронная аппаратура и основы её конструкторского . проектирования: учебно-методическое пособие для студентов спец. «Моделирование и компьютерное проектирование» и «Проектирование и производство РЭС». - Минск: БГУИР, 2008. - 200 с.
- 19 Панков Л.Н., Асланянц В.Р., Долгов Г.Ф., Евграфов В.В. Основы проектирования . электронных средств: Учеб. Пособие. - Владимир: Владим. гос. ун-т, 2007. - 239 с.
- 20 Парфенов Е.М. и др.. Проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры: . Учеб. пособие для вузов/ Е.М. Парфенов, Э.Н. Камышная, В.П. Усачев. – М.: Радио и связь, 1989. – 272 с.
- 21 Ненашев А.П.. Конструирование радиоэлектронных средств.. - М.: Высш. шк. , 1990. - . 432 с.
- 22 Фрумкин Г.Д. Расчет и конструирование радиоэлектронной аппаратуры.. – М.: Высш. . шк., 1985. – 287 с.
- 23 Дульнев Г.Н., Семьяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. - М.: Энергия, . 1968. - 359 с.
- 24 Большаков В.П., Бочков А.Л., Сергеев А.А. 3D-моделирование в AutoCAD, КОМПАС-3D, . SolidWorks, Inventor, T-Flex. - СПб: Питер, 2011. - 336 с.
- 25 Прохоренко В.П. SolidWorks. Практическое руководство. — М.: ООО «Бином-Пресс», . 2004. — 448 с.
- 26 // SolidWorks Russia: [сайт]. [2014]. URL: http://www.solidworks.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=174&Itemid=9

- 27 Сорокин В., Алямовский А., "Проектирование радиоэлектронной аппаратуры в среде . SolidWorks," *САПР и графика*, август 2010. pp. 67-74.
- 28 Алямовский. COSMOSWorks. Основы расчёта конструкций на прочность в среде . SolidWorks. - М.: ДМК Пресс, 2010. - 784 с.
- 29 Алямовский А. А. и др.. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной . практике / Авторы: Алямовский А. А., Собачкин А. А., Одинцов Е. В., Харитонович А. И., Пономарев Н. Б.. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 800 с.
- 30 КОМПАС-3D V14. Больше чем CAD // Компания "Аскон". URL: <http://ascon.ru/>
.
- 31 Басов К.А. CATIA V5. Геометрическое моделирование. - М.: ДМК Пресс , 2008. - 269 с.
.
- 32 Уваров А.С. P-CAD. Проектирование и конструирование электронных устройств. - М.: . Горячая линия - Телеком, 2004. - 760 с.
- 33 Стешенко В.Б. P-CAD. Технология проектирования печатных плат. — СПб: БХВ-Петербург, . 2003. - 720 с.
- 34 Саврушев Э.Ц. P-CAD 2006. Руководство схемотехника, администратора библиотек, . конструктора. — М.: ООО «Бином-Пресс», 2007 — 768 с.
- 35 Уваров А.С. Программа P-CAD. Электронное моделирование. - М.: Диалог-МИФИ, 2008. . - 192 с.
- 36 Лопаткин А.В. P-CAD 2004. - СПб : БХВ-Петербург, 2006. - 560 с.
.
- 37 Иванова Н.Ю., Петров А.С., Поляков В.И., Романова Е.Б.. Технология проектирования . печатных плат в САПР P-CAD-2006: Учебное пособие. - СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. - 168 с.
- 38 Сабунин А.Е. Российская документация [Электронный ресурс] // Altium Wiki: [сайт]. URL: . <http://wiki.altium.com/display/RUPROD/Home>
- 39 Сабунин А.Е. Altium Designer. Новые решения в проектировании электронных устройств. . - М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2009. - 432 с.
- 40 Суходольский В.Ю.. Сквозное проектирование функциональных узлов РЭС на печатных . платах в САПР Altium Designer 6.: Учебное пособие. Часть 1. - СПб: СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2008. - 152 с.
- 41 Суходольский В.Ю. Сквозное проектирование функциональных узлов РЭС на печатных . платах в САПР Altium Designer 6.: Учебное пособие. Часть 2. - СПб: СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2009. - 108 с.
- 42 Куликов Д.Д., Соболев С.Ф. Интеллектуальные программные комплексы для . технической и технологической подготовки производства / Часть 9. Системы проектирования технологических процессов электронных приборов / Куликов Д. Д., Соболев С. Ф. Учеб.-методич. пособие. - СПб.: СПбГУ ИТМО, 2012. - 80 с.

- 43 // DipTrace - Сайт компании Новарм: [сайт]. [2002]. URL: <https://diptrace.com/rus/>
- 44 Проектирование топологии PADS Layout // Компания Megratec (Mentor Graphics Technologies).. URL: <http://www.megratec.ru/catalog/327/?theme=4969>
- 45 Уваров А.С. Проектирование печатных плат. 8 лучших программ. - М.: ДМК Пресс, 2009. - 288 с.
- 46 С.Лузин, Г.Петросян, О.Полубасов, "ТороR – современная САПР печатных плат," *Печатный монтаж*, No. 1, 2009. pp. 10-13.
- 47 Сергеев А., "OrCAD PCB Designer Standard - лучший редактор печатных плат для профессионалов," *Современная электроника*, Aug 2014. pp. 1-4.
- 48 Шалумов А.С., Малютин Н.В., Кофанов Ю.Н., Способ Д.А., Жадное В.В., Носков В.Н., Ваченко А.С. Автоматизированная система АСОНИКА для проектирования высоконадежных радиоэлектронных средств на принципах CALS-технологий. Том I/ Под ред. Кофанова Ю.Н. - М.: Энергоатомиздат, 2007. - 368 с.
- 49 Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров: Справ, пособие. - М. : Машиностроение-1, 2004. - 512 с.
- 50 Программные продукты ANSYS [Электронный ресурс] // Группа компаний "ПЛМ Урал" - "Делкам-Урал" – Единый центр поддержки продуктов ANSYS в России и странах СНГ: [сайт]. [2014]. URL: <http://www.cae-expert.ru/product/overview>
- 51 // Программное обеспечение NI AWR: [сайт]. URL: <http://www.awrcorp.com/sites/default/files/content/attachments/PTFL-RU-2017-Final.pdf>
- 52 В.Д. Разевиг, Ю.В. Потапов, А.А. Курушин. Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office. Под ред. В.Д. Разевига. - М.: СОЛОН-Пресс, 2003. - 496 с.
- 53 Edition N.A.D.E. Руководство по Analog Office // Системный интегратор ЗАО "НПП "Родник". 2018. URL: <https://www.rodnik.ru/upload/iblock/b3b/b3b132b0a4fec7c2939c85089d478148.pdf>
- 54 Лузин С., Полубасов О., "Топологическая трассировка - реальность или миф?," *EDA EXPERT*, Май 2002. pp. 42 - 46.
- 55 МОСКВА, АРМС-ТАСС. Концерн "Радиоэлектронные технологии" представит новейшее бортовое оборудование и системы радиолокации и навигации для вертолетов на выставке HeliRussia-2014 [Электронный ресурс] // Информационное агентство «ОРУЖИЕ РОССИИ»: [сайт]. [2014]. URL: http://www.arms-expo.ru/news/aviasalony_i_vystavki/kontsern_radioelektronnye_tekhnologii_predstavit_noveyshee_bortovoe_oborudovanie_i_sistemy_radioloka/?sphrase_id=5568655