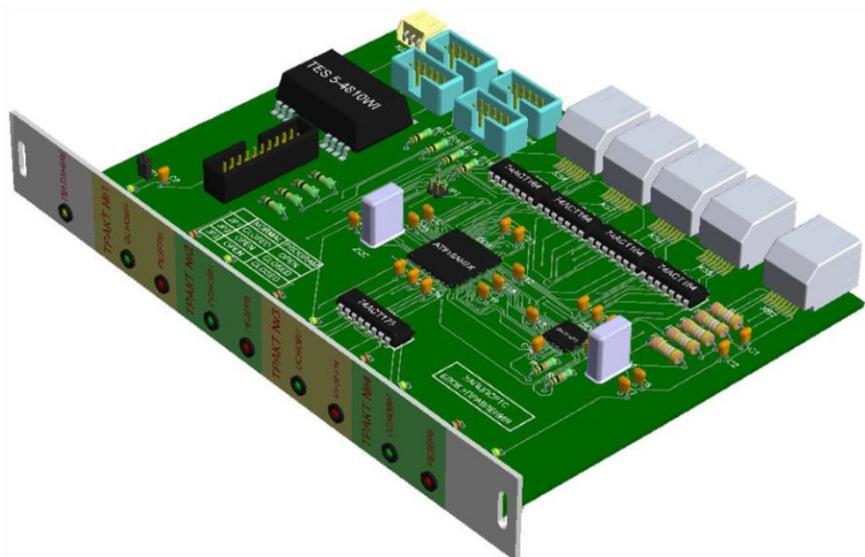




компас

Кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры

Информационные технологии проектирования радиоэлектронных средств



Томск 2016

Кобрин Юрий Павлович

Информационные технологии проектирования радиоэлектронных средств. Учебное пособие к курсовому и дипломному проектированию 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, 2016. – 76 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 основные вопросы проектирования радиоэлектронных средств различного назначения с применением на всех этапах компьютерных технологий.

Учебное пособие предназначено для помощи в подготовке 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.

© Кафедра КИПР федерального Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 2016.

© Кобрин Ю.П. 2016

СОДЕРЖАНИЕ

1 Введение	3
1.1 Информационные технологии	3
1.2 Термины, используемые при ИТ проектировании РЭС	6
2 Информационные технологии проектирования РЭС	15
2.1 Организация проектирования РЭС с помощью ИТ.....	15
2.2 Конструкторская документация (КД).....	16
2.3 Математические модели (ММ) РЭС	22
2.4 Маршрут проектирования	23
2.5 Типовые проектные процедуры	23
2.6 Оптимизация РЭС	24
2.6.1 Постановка задачи	24
2.6.2 Использование типовых проектных процедур при ИТ-проектировании РЭС.....	25
2.7 Типовой маршрут проектирования	27
2.8 Системный подход к проектированию конструкций РЭС	28
2.9 ИТ и жизненный цикл РЭС	33
2.10 Стадии разработки конструкторской документации при проектировании с помощью ИТ	39
3 Системы автоматизированного проектирования	44
3.1 Технологии проектирования РЭС.....	44
3.2 Комплексные (интегрированные САПР).....	46
3.3 САПР геометрического проектирования деталей и сборок РЭС (MCAD)	46
3.3.1 «Solid Works» – система инженерного 3D-моделирования.....	46
3.3.2 Система трёхмерного твердотельного и поверхностного параметрического проектирования Autodesk Inventor	51
3.3.3 «Компас» — отечественная САПР трёхмерного проектирования, позволяющая оформлять конструкторскую документацию по стандартам ЕСКД	52
3.3.4 САПР высокого уровня CATIA	53
3.4 САПР проектирования печатных узлов	55
3.4.1 САПР P-CAD	55
3.4.2 САПР Altium Designer.....	56
3.4.3 САПР OrCAD/Allegro	58
3.4.4 САПР Mentor Graphics	59
3.4.5 САПР TopoR.....	60
3.4.6 САПР DipTrace	61
3.5 САПР моделирования режимов РЭС	62
3.5.1 «АСОНИКА» - автоматизированная система обеспечения надёжности и качества РЭС.....	62
3.5.2 «ANSYS» - универсальная система конечно-элементного анализа	65
3.5.3 «Microwave Office» - система проектирования высокочастотных и сверхвысокочастотных РЭС	67
4 Список литературы	68

1 Введение

1.1 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 (ИТ, от англ. *information technology*, ИТ), занимают ведущие позиции в мировой экономике, определяют дальнейшие направления развития конкурентоспособной продукции (Рис. 1.1).

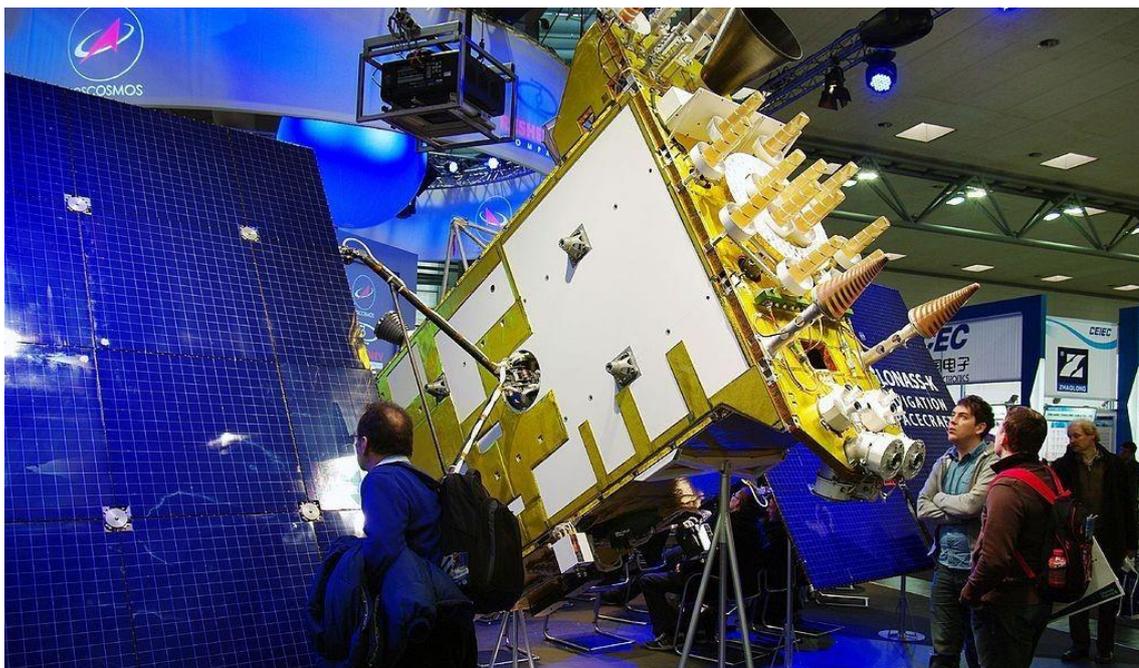


Рис. 1.1 – Космический аппарат «Глонасс-К» российской глобальной навигационной системы ГЛОНАСС, разработанный ОАО «Информационные спутниковые системы имени академика М. Ф. Решетнёва»

Согласно определению, принятому ЮНЕСКО [1], ИТ — 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.

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, а также услуг, которые бы не содержали или не использовали электронных средств. Жизнь каждого современного человека так или иначе связана с применением электронных средств. 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, CALS-технологий и т.д.

Современные информационные технологии с их стремительно растущим потенциалом и быстро снижающимися издержками открывают огромные возможности для новых форм организации труда и занятости в рамках как отдельных корпораций, так и общества в целом. Спектр таких возможностей значительно расширяется - нововведения воздействуют на все сферы жизни людей, семью, образование, работу, географические границы человеческих общностей и т.д. Сегодня информационные технологии могут внести решающий вклад в укрепление взаимосвязи между ростом производительности труда, объёмов производства, инвестиций и занятости.

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 [2,3,4,5,6,7,8,9,10,11]. Это процесс непрерывного уточнения модели проектируемого РЭС от замысла в виде **технического задания (ТЗ)** к готовому проекту. В процессе создания новых РЭС проектировщик, преодолевая многообразные ограничения технического задания, 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 своих аналогов и прототипов, т.е. имело меньшую стоимость, использовало новые, более совершенные физические явления и принципы функционирования, более совершенную элементную базу, улучшенную конструкцию, прогрессивные технологии изготовления и т.п.

Поднять производительность труда проектировщиков, повысить качество, удешевить и сократить сроки проектирования можно с помощью эффективных **информационных технологий проектирования РЭС** [12,13,14,15], 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. Разра-

ботка 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. Улучшается качество и 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.

2. Повышается производительность труда, сокращается время проектирования. Например, графическая документация на компьютере разрабатывается не менее чем в 3 раза быстрее, чем традиционно. Информация представляется в электронном виде, что существенно увеличивает скорость доступа к практически неограниченным по объёму архивам документов, проектной и технологической документации. Обмен и обработка информации в подобном виде гораздо удобнее и эффективнее, чем в бумажном виде.

3. Снижается стоимость и трудоёмкость 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, что позволяет снизить количество ошибок, а нередко и уменьшить штатное количество сотрудников. Это даёт возможность сократить затраты на оплату труда и снизить риски возникновения ошибок вследствие недостаточной компетенции разработчиков, ошибок при ручных расчётах и т.п.

4. Сокращаются затраты на усовершенствование РЭС. Быстрее и эффективнее воплощаются в жизнь требования, выдвигаемые заказчиком. Программы анализа и имитации работы РЭС позволяют легко усовершенствовать прототип без натурального макетирования. Оперативные и качественнее осуществляется модернизация текстовой и графической документации прототипа. Текстовые и графические процессоры, а также всевозможные САПР позволяют с незначительными затратами труда создавать новые и адаптировать к новым проектам любые ранее созданные текстовые и графические документы.

5. Улучшается качество управления и исполнения проектов. При ручном проектировании 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, в то же время при использовании компьютера любая часть чертежа для детального просмотра и корректировки может быть увеличена, а координаты любой его точки заданы с нужной точностью. Современные периферийные устройства (принтеры, плоттеры) представляют линии и тексты независимо от индивидуальных способностей человека и, следовательно, качество выполнения чертежа от мастерства разработчика не зависит.

В первые годы применения ИТ-технологий проектирования РЭС бытовало мнение о возможности снижении требований к квалификации проектировщиков - компьютеры сами всё смогут! Однако эта точка зрения не получила подтверждения практикой, так как помимо владения предметной областью при использовании информационных технологий проектирования инженер-проектировщик должен знать математические модели, методы и методики автоматизированного проектирования и уметь эффективно использовать их особенности. А это предъявляет повышенные требования к уровню профессиональной подготовки инженера.

Очевидно, что решение задачи ускорения социально-экономического развития России на основе ИТ-технологий требует непрерывного улучшения профессиональной подготовки проектировщиков РЭС, повышения их квалификации и компетентности в разработке радиоэлектронных средств (РЭС).

Дисциплина «Информационные технологии проектирования РЭС» (ИТП РЭС) является одним из важнейших заключительных предметов подготовки специалистов в области конструирования и технологии производства РЭС. Даная дисциплина базируется на знаниях, приобретённых студентами при изучении всех предшествующих общеобразовательных и специальных дисциплин.

Основной задачей курса является изучение общих правил проектирования РЭС на уровне блоков и устройств, ознакомление и приобретение практических навыков использованием ИТ при их конструировании, расчётах, анализе, синтезе и оптимизации.

В результате изучения дисциплины ИТП РЭС студент должен уметь:

- составлять ТЗ на проектирование РЭС;
- выбирать элементную базу для построения узлов и блоков РЭС;
- проектировать печатные узлы, конструкции и блоки РЭС;
- выполнять основные расчёты по определению показателей конструкции, надёжности, помехоустойчивости, механической прочности и тепловых режимов РЭС;
- в соответствии с правилами художественного конструирования и технической эстетики определять конфигурацию РЭС и внешнее оформление, удовлетворяющее требованиям условий эксплуатации и эргономики;
- оформлять конструкторскую документацию (КД) на узлы и блоки и РЭС в целом в соответствии со стандартами ЕСКД и другими нормативными документами.

1.2 Термины, используемые при ИТ проектировании РЭС

Радиоэлектронное средство (РЭС) — изделие и/или его составные части, в основу функционирования которых положены принципы радиотехники и электроники [16].

Радиоэлектронные средства — технические средства, предназначенные 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.

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

Проектирование (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.

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.

Конструкция РЭС (лат, *constructio* - составление, построение) - совокупность элементов различных форм и свойств, определённым образом находящихся в пространстве, имеющих механическую, электрическую, электромагнитную и тепловую связи. Связи обеспечивают необходимую надёжность, точность, стабильность функционирования РЭС в заданных условиях эксплуатации и обеспечивают возможность производства при заданных экономических требованиях в необходимом количестве изделий.

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) - совокупность конструкторских документов, содержащих данные, необходимые для проектирования (разработки), изготовления, контроля, приёмки, поставки, эксплуатации, ремонта, модернизации, утилизации изделия. КД может быть выполнена как на бумажном или аналогичном носителе (кальке, микрофильмах, микрофишах и т.п.), так и на электронном носителе, выполненным с применением программно-технических средств (ГОСТ 2.001-2013) [17].

Несущая конструкция РЭС 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.

Технология (греч, *techne* - 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.

Технологичность – 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.

Качество – 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 совокупностью таких характеристик как целевое назначение, надёжность, безопасность и др.

Конструктивная и технологическая приемственность - 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 - 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 – 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 [18]. 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) [17], 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) [19], 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) [20], устанавливающая взаимосвязанные правила разработки, оформления и обращения программ и программной документации;
- единая система технологической подготовки производства (ЕСТПП) [21], 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 (ОС, 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 [22].

Печатная плата (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) электронной схемы (Рис. 1.2). Печатная плата (**ПП**) предназначена для электрического и механического соединения различных электронных компонентов обычно с помощью пайки.

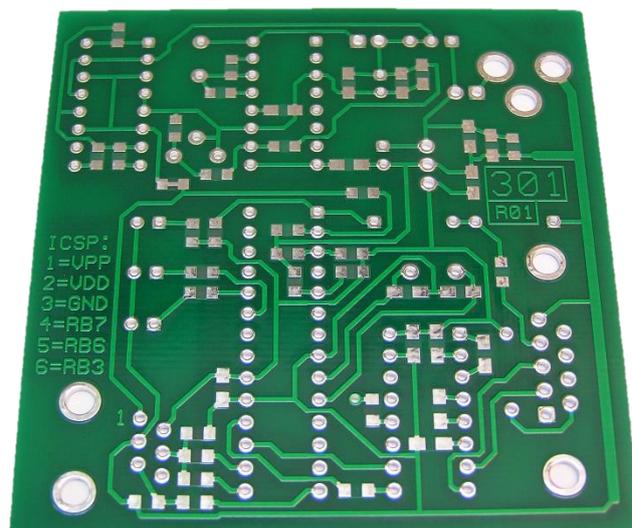


Рис. 1.2 - Печатная плата

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. 1.3).



Рис. 1.3 - Печатный узел

Микросборка (МСБ) – (Рис. 1.4) 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.

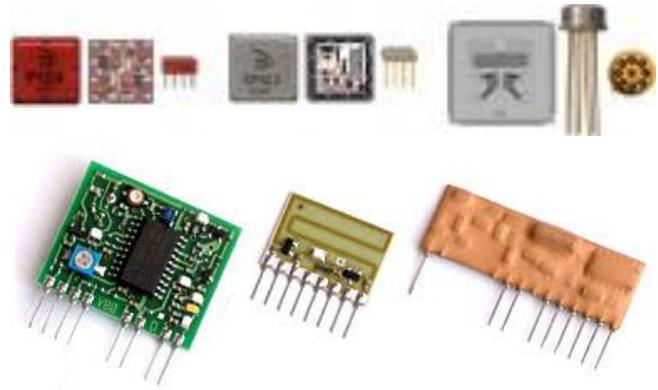


Рис. 1.4 - Микросборки

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.

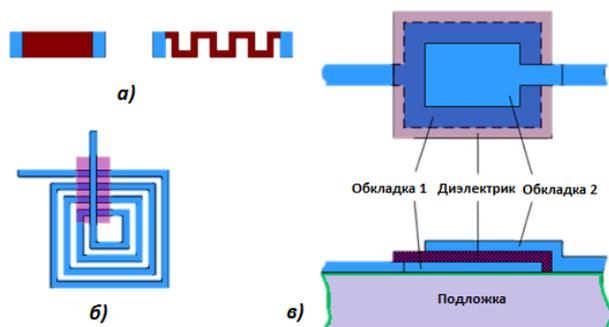


Рис. 1.5 - Конструкции плёночных элементов:
а) - резисторов, б) - индуктивностей и
в) - ёмкостей

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.

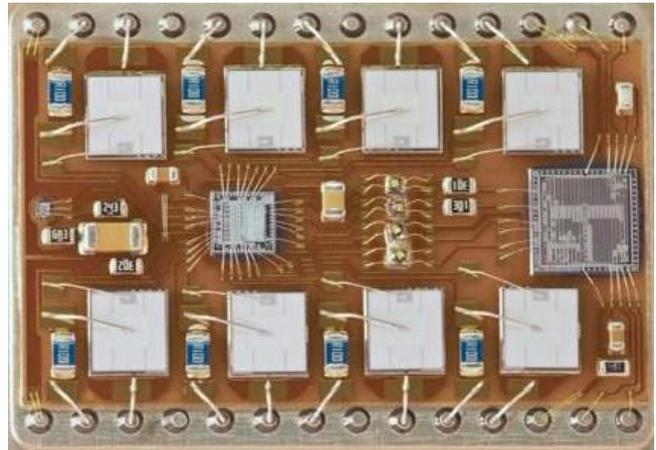


Рис. 1.6 - Микросборка с бескорпусными компонентами

Блок – автономно законченная конструкция ЭС, характеризующаяся системой выходных параметров и имеющая общий кожух, панель – основание и элементы как электрической, так и механической стыковки с другими блоками. Функциональная сложность блока зависит от его элементного базиса.



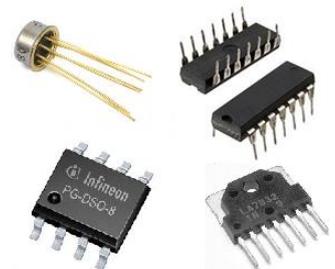
Рис. 1.7 - Блок РЭС

Субблок – часть блока, выполняющая функцию его отдельного тракта, например, тракта усилителя.

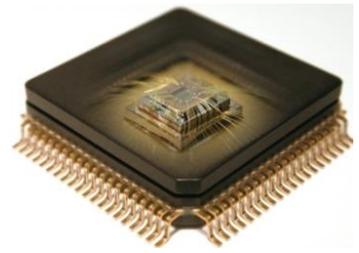
Функциональный узел (ФУ) – конструктивно и функционально законченная часть блока, характеризующаяся определёнными выходными параметрами и собираемая из нескольких радиодеталей. Примерами ФУ могут являться корпусированные ИС, бескорпусные ГИС (МСБ), микромодули, модули на печатном монтаже.

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

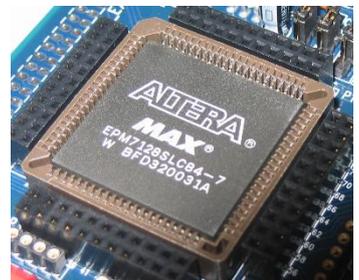
Интегральная микросхема (ИМС, англ. IC - *Integrated Circuit*) – микроэлектронная схема произвольной сложности (кристалл), изготовленная на полупроводниковой подложке (пластине или плёнке) и помещённая в неразборный корпус или без него (если она входит в состав микросборки). Использование ИМС способствует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



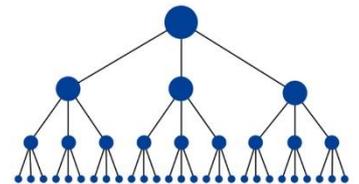
Большая интегральная схема (БИС) содержит многие тысячи элементов в кристалле. Использование БИС позволяет резко уменьшить число сборочных и монтажных операций, количество внешних недостаточно надёжных соединений.



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 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.



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. САПР в значительной степени позволяют 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 (англ. Computer-Aided Engineering) — средства автоматизации различных инженерных задач: расчётов, анализа и симуляции физических процессов, осуществляют динамическое моделирование, проверку и оптимизацию изделий. Как правило используются численные методы решения дифференциальных уравнений.

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). Такие САПР применяются для разработки деталей и сборок РЭС на основе технологий поверхностного и объёмного моделирования.

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.

Жизненный цикл (ЖЦ) РЭС - упорядоченная совокупность изменений его состояний от начального (возникновение замысла) до конечного (прекращение деятельности, утилизация).

CALS-технология (англ. *Continuous Acquisition and Life-cycle Support*) – это непрерывная информационная поддержка всего жизненного цикла (ЖЦ) продукции, которая основывается на стандартизации методов представления данных на каждой стадии жизненного цикла изделия и на безбумажном электронном обмене данными. Кроме этого концепция CALS определяет набор правил, регламентов и стандартов, в соответствии с которыми строится электронное взаимодействие участников процессов проектирования, производства, испытания и т.д.

CALS-технология представляет собой программно-технический комплекс в виде интегрированных ИТ поддержки всех этапов жизненного цикла продукции, соответствующих требованиям CALS-стандартов. Впервые CALS-технология стала использоваться Министерством обороны США (1985 г.) в рамках глобальной автоматизированной системы электронного описания всех этапов проектирования, производства и эксплуатации продуктов военного назначения. Это позволило на треть ускорить выполнение НИОКР, уменьшить затраты на закупку военной продукции на 30 %, а также в 9 раз сократить время на корректировку проектов. Разработаны и ряд Российских стандартов серии ГОСТ Р ИСО 10303-1-99 [23], являющихся аутентичными переводами соответствующих международных стандартов.

CRM - (англ. *Customer Relationship Management* - система управления взаимоотношениями с клиентами) — прикладное программное обеспечение для организаций, предназначенное для автоматизации стратегий взаимодействия с заказчиками (клиентами), в частности, для повышения уровня продаж, оптимизации маркетинга и улучшения обслуживания клиентов путём сохранения информации о клиентах и истории взаимоотношений с ними, установления и улучшения бизнес-процессов и последующего анализа результатов.

ERP (англ. *Enterprise Resource Planning*, планирование ресурсов предприятия) — организационная стратегия интеграции производства и операций, управления трудовыми ресурсами, финансового менеджмента и управления активами, ориентированная на непрерывную балансировку и оптимизацию ресурсов предприятия посредством специализированного интегрированного пакета прикладного программного обеспечения, обеспечивающего общую модель данных и процессов для всех сфер деятельности.

PLM-система (англ. *product lifecycle management*) — прикладное программное обеспечение для управления жизненным циклом продукции.

PDM-система (англ. *Product Data Management* — система управления данными об изделии) — организационно-техническая система, обеспечивающая управление всей информацией об изделии. При этом в качестве изделий могут рассматриваться различные

сложные технические объекты (корабли и автомобили, самолёты и ракеты, компьютерные сети и др.). PDM-системы являются неотъемлемой частью PLM-систем.

SCM (англ. *supply chain management* - управление цепями поставок) - управленческая концепция и организационная стратегия, заключающаяся в интегрированном подходе к планированию и управлению всем потоком информации о сырье, материалах, продуктах, услугах, возникающих и преобразующихся в логистических и производственных процессах предприятия, нацеленном на измеримый совокупный экономический эффект (снижение издержек, удовлетворение спроса на конечную продукцию).

MRPII (англ. *Material Requirements Planning* — планирование потребности в материалах) — система планирования потребностей в материалах, одна из наиболее популярных в мире логистических концепций (версия 2).

MES (англ. *manufacturing execution system*, система управления производственными процессами) — специализированное прикладное программное обеспечение, предназначенное для решения задач синхронизации, координации, анализа и оптимизации выпуска продукции в рамках какого-либо производства.

SCADA (англ. *supervisory control and data acquisition*, диспетчерское управление и сбор данных) — программный пакет, предназначенный для разработки или обеспечения работы в реальном времени систем сбора, обработки, отображения и архивирования информации об объекте мониторинга или управления.

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

Маркетинг - организация производства и сбыта продукции, основанная на изучении потребности рынка в товарах и услугах

Бизнес-процесс (англ. *Business Processes Reengineering*) – взаимосвязанный комплекс работ, структурированный набор действий, направленных на создание определённого продукта или услуги для потребителей.

Инжиниринг - сфера деятельности по проработке вопросов создания объектов промышленности, инфраструктуры и др., прежде всего в форме предоставления на коммерческой основе различных инженерно-консультационных услуг.

Логистика - наука об организации рационального планирования, контроля и управления транспортированием, складированием и другими материальными и нематериальными операциями, совершаемыми в процессе доведения сырья и материалов до производственного предприятия, внутризаводской переработки сырья, материалов и полуфабрикатов, доведения готовой продукции до потребителя в соответствии с интересами и требованиями последнего, а также передачи, хранения и обработки соответствующей информации.

2 Информационные технологии проектирования РЭС

2.1 Организация проектирования РЭС с помощью ИТ

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.

Для того чтобы спроектировать РЭС необходимы:

- время на разработку;
- наличие организованного коллектива людей достаточной квалификации;
- необходимые материалы, компоненты, детали, приборы, оборудование, производственные площади;
- система технических соглашений, оформленных в виде стандартов ЕСКД (комплекс государственных стандартов, устанавливающий порядок разработки, оформления и обращения конструкторских документов), руководящих технических материалов (РТМ), технических условий (ТУ) предприятий и отраслей.

Все эти проблемы решаются в рамках **проекта**, в котором устанавливается совокупность элементов и деталей с различными физическими свойствами и формами, находящихся в установленной электрическими схемами и конструкторской документацией пространственной, механической, тепловой и электромагнитной взаимосвязи, обеспечивающей выполнение РЭС заданных функций в условиях воздействия на неё различных факторов: производственных, эксплуатационных, человеческих.

В проекте должны быть установлены:

- значения параметров структурных, функциональных и электрических схем РЭС;
- способы выполнения электрических связей;
- дизайн и размеры элементов конструкции;
- взаимное расположение компонентов и узлов, характер их крепления;
- марки применяемых материалов;
- способы защиты от совокупности воздействий внешней среды, существенно влияющих на работоспособность РЭС: температуры окружающей среды, влажности, давления и других атмосферных воздействий;
- способы обеспечения электромагнитной совместимости, механической прочности, нормальных тепловых режимов и заданной надёжности РЭС;
- способы обеспечения заданной надёжности и т.д.;
- возможности стандартных и особых технологических процессов в производстве РЭС и т. д.

Проектирование РЭС или его составных частей – творческий процесс. Образ любого сложного РЭС (проект) в наше время обычно создаётся в воображении человека в процессе

его взаимодействия с компьютером. Чтобы разработать РЭС с помощью ИТ, проектировщик должен владеть компьютерной техникой, обладать хорошими знаниями по многочисленным техническим, экономическим и другим дисциплинам (физике, математике, радиоэлектронике, организации и технологии производства и т. д.), знать возможности современной элементной базы и условия эксплуатации, уметь пользоваться стандартами и другими руководящими техническими материалами.

2.2 Конструкторская документация (КД)

Основой компетентного оформления конструкторской документации в России является комплекс стандартов ЕСКД - единая система конструкторской документации (ГОСТ 2.001-93. Общие положения). ЕСКД устанавливает взаимосвязанные нормы и правила по разработке, оформлению и обращению конструкторской документации, разрабатываемой и применяемой на всех стадиях жизненного цикла РЭС. К конструкторским документам относят графические и текстовые документы, которые в отдельности или в совокупности определяют состав и устройство изделия и содержат необходимые данные для его разработки или изготовления, контроля, приёмки, эксплуатации и ремонта.

Комплект документации проекта определяет, какие материальные, людские и временные ресурсы потребуются для изготовления РЭС и в какой последовательности необходимо произвести работы. Состав конструкторской документации устанавливает ГОСТ 2.102-2013 «Виды и комплектность конструкторских документов» [24]. Таблица 2.1 знакомит с важнейшими видами КД, разрабатываемых на изделия.

Таблица 2.1 – Важнейшие виды КД, разрабатываемых на изделия

Код документа	Вид документа	Определение	Дополнительные указания
	Электронная модель детали	Документ, содержащий электронную геометрическую модель детали и требования к её изготовлению и контролю. В зависимости от стадии разработки он включает в себя предельные отклонения размеров, шероховатости поверхностей и др.	По ГОСТ 2.052-2006
	Чертёж детали	Документ, содержащий изображение детали и другие данные, необходимые для её изготовления и контроля	По ГОСТ 2.052-2006, ГОСТ 2.109-73, ГОСТ 2.305-2008

Код доку- мента	Вид документа	Определение	Дополнительные указания
ЭСБ	Электронная модель сборочной единицы	Документ, содержащий электронную геометрическую модель сборочной единицы, соответствующие электронные геометрические модели составных частей, свойства, характеристики и другие данные, необходимые для сборки (изготовления) и контроля.	По ГОСТ 2.052-2006, ГОСТ 2.057-2014
СБ	Сборочный чертёж	Документ, содержащий изображение сборочной единицы и другие данные, необходимые для её сборки (изготовления) и контроля.	По ГОСТ 2.109-73. Для сборочных единиц обязательно разрабатывают сборочный чертёж и спецификацию
ВО	Чертёж общего вида	Документ, определяющий конструкцию изделия, взаимодействие его составных частей и поясняющий принцип работы изделия	По ГОСТ 2.118-2013, ГОСТ 2.119-2013, ГОСТ 2.120-2013
ТЧ	Теоретический чертёж	Документ, определяющий геометрическую форму (контур) изделия и координаты расположения составных частей	По ГОСТ 2.419-68
ГЧ	Габаритный чертёж	Документ, содержащий контурное (упрощённое) изображение изделия с габаритными, установочными и присоединительными размерами	По ГОСТ 2.109-73
МЭ	Электромонтажный чертёж	Документ, содержащий данные, необходимые для выполнения электрического монтажа изделия	По ГОСТ 2.413-72
МЧ	Монтажный чертёж	Документ, содержащий контурное (упрощённое) изображение изделия, а также данные, необходимые для его установки (монтажа) на месте применения.	По ГОСТ 2.109-73

Код доку- мента	Вид документа	Определение	Дополнительные указания
УЧ	Упаковочный чер- тёж	Документ, содержащий дан- ные, необходимые для вы- полнения упаковывания из- делия	По ГОСТ 2.418-2008
По ГОСТ 2.701	Схема	Документ, на котором пока- заны в виде условных изоб- ражений или обозначений составные части изделия и связи между ними	По ГОСТ 2.701-2008. Данные об элемен- тах следует записы- вать в перечень эле- ментов
Э1	Схема электриче- ская структурная	Документ, определяющий ос- новные функциональные ча- сти изделия, их назначение и взаимосвязи	По ГОСТ 2.702-2011.
Э2	Схема электриче- ская функциональ- ная	Документ, разъясняющий процессы, протекающие в от- дельных функциональных це- пях изделия или изделия в целом	По ГОСТ 2.702-2011.
Э3	Схема электриче- ская принципиаль- ная	Документ, содержащий в виде условных изображений или обозначений составные части изделия, действующие при помощи электрической энергии, и их взаимосвязи	По ГОСТ 2.702-2011, ГОСТ 2.705, ГОСТ 2.709-89, ГОСТ 2.710-81, ГОСТ 2.730-73, ГОСТ 2.755-87,
	Спецификация	Документ, определяющий со- став сборочной единицы, комплекса или комплекта	По ГОСТ 2.106-96
ПЭ	Перечень элемен- тов	Документ, который прилага- ется к электрической принци- пиальной схеме и содержит подробную информацию обо всех присутствующих радио- электронных компонентах	По ГОСТ 2.701-2008
ВС	Ведомость специ- фикаций	Документ, содержащий пере- чень всех спецификаций со- ставных частей изделия с ука- занием их количества и вхо- димости	По ГОСТ 2.106-96

Код документа	Вид документа	Определение	Дополнительные указания
ПЗ	Пояснительная записка	Документ, содержащий описание устройства и принципа действия разрабатываемого изделия, а также обоснование принятых при его разработке технических и технико-экономических решений	По ГОСТ 2.106-96, ГОСТ 7.32-2001
РР	Расчёт	Документ, содержащий расчёты параметров и величин, например расчёт размерных цепей, расчёт на прочность и др.	По ГОСТ 2.106-96
По ГОСТ 2.601	Эксплуатационные документы	Документы, предназначенные для использования при эксплуатации, обслуживании и ремонте изделия в процессе эксплуатации	По ГОСТ 2.106-96
И..	Инструкция	Документ, содержащий указания и правила, используемые при изготовлении изделия (сборке, регулировке, контроле, приёмке и т.п.).	По ГОСТ 2.106-96

В **основной комплект конструкторских документов** входят документы, составленные на все данное изделие в целом, например, сборочный чертёж, принципиальная электрическая схема, технические условия, эксплуатационные документы. Конструкторские документы составных частей в основной комплект документов изделия не входят. В состав комплекта КД на изделие или его составную часть обязательно входит основной конструкторский документ, который полностью и однозначно определяют данное изделие и его состав. За основные конструкторские документы принимают: для деталей — чертёж детали; для сборочных единиц, комплексов и комплектов — спецификацию.

Безбумажные технологии. Кроме традиционных бумажных носителей, во многие проекты всё больше включают и современные съёмные компьютерные носители информации (магнитные и оптические диски, флэш-накопители и т.п.), позволяющие компактно хранить огромное количество документов в электронном виде (межгосударственный стандарт ГОСТ 2.051-2013 [25]), а также использовать их в САПР и управлять автоматизированным технологическим оборудованием.

Электронный конструкторский документ (ЭКД) - структурированный набор данных, включающий в себя заголовок, содержательную часть и электронно-цифровую подпись. Электронный конструкторский документ используется в качестве формы представления результатов работы, предназначенной для передачи из одной автоматизированной системы в другую или последующей визуализации. Обычно он зафиксирован в виде файла на спе-

циальных носителях (диски, USB-флешки и другие компактные съёмные носители информации) и его можно передавать или обрабатывать в пространстве и времени в информационных системах, используя средства телекоммуникационных (компьютерных) сетей.

Отказ от традиционной «бумажной среды» в пользу электронной конструкторской документации даёт целый ряд преимуществ:

- существенно уменьшаются объёмы бумажных архивов, содержащих значительные объёмы конструкторской, технологической и другой документации;
- удобное использование электронных моделей в САПР для визуального отображения конструкции РЭС, изготовления чертёжной конструкторской документации [26];
- упрощается процесс освоения процедур проектирования, эксплуатации, ремонта и технического обслуживания РЭС за счёт возможности использования мультимедийных данных и интерактивных 3D-моделей;
- открывается возможность быстрого поиска нужных файлов-документов по ключевым признакам с помощью *автоматизированных систем управления документооборотом* организации, что гораздо оперативнее, чем поиск бумажных документов;
- облегчается поиск необходимой информации внутри файлов и доступа к ней непосредственно с экрана дисплея, без распечатки на бумаге;
- появляется возможность просто, качественно и оперативно совершать многие важные операции (редактирование, удаление, архивирование, длительное хранение и т.д.);
- облегчается внесение изменений в конструкцию и технологию изготовления РЭС, модификация ранее созданных документов, используемых в новой разработке;
- открывается возможность совместной коллективной работы людей (даже если они разделены территориально) над всевозможными электронными документами, содержащими любую текстовую, графическую, звуковую и другую информацию благодаря централизованной серверной¹ базе данных;
- открывается возможность оперативной (от нескольких минут до нескольких часов) передачи документов любому количеству иных организаций по электронной почте;
- возможность регулярно создавать резервные копии документов, благодаря чему исключается возможность безвозвратной пропажи документа, случайного или преднамеренного их уничтожения.

Юридическую значимость электронному документу и защиту его от несанкционированного доступа придаёт **электронная цифровая подпись**², которая обладает теми же самыми возможностями, что и обычная бумажная. При этом информация может находиться

¹ **Сервер** (от англ. *to serve* - служить) - выделенный компьютер, предоставляющий ряд сетевых услуг (сервисов), таких как хранение файлов, их печать, обеспечение связи с другими компьютерами компьютерной сети.

² **Электронная цифровая подпись** (ЭЦП) - это особый реквизит документа, полученный в результате криптографического (шифровального) преобразования информации с использованием закрытого ключа подписи, позволяющий установить отсутствие несанкцио-

в файлах ЭКД в зашифрованном виде. Сокращается время согласования и утверждения ЭКД. Электронные документы несложно подписывать, даже если те, кто должен их визуировать, находятся на значительном расстоянии друг от друга.

Обычно в проекте стремятся максимально использовать опыт проектирования похожих объектов. Вместе с тем, используя новые физические явления и принципы функционирования, более совершенную элементную базу, усовершенствованные конструкции и передовые технологические процессы, стремятся создавать новые РЭС гораздо более качественнее, функциональнее и эффективнее своих аналогов³ и прототипов⁴.

В ходе проектирования РЭС проектировщику приходится **неукоснительно** учитывать значительное количество ограничений, обусловленных характеристиками внешней среды и возможностями реализации тех или иных параметров и процессов:

- ресурсных (материальные, временные, кадровые, энергетические);
- системотехнических, связанных с типом проектируемых РЭС (аналоговые или цифровые, наземные или бортовые, с возможным резервированием или без него, работающие в режимах разового или многократного, непрерывного или периодического использования и т.д.);
- схемотехнических, зависящих от используемых электрических схем и элементной базы (быстродействие, токи, напряжения, помехоустойчивость, чувствительность к теплу, стабильность параметров и т.д.);
- конструкторских (допустимым массе и габаритам, рекомендуемым типам базовых несущих конструкций, способам реализации электрических связей, ограничительным перечням на материалы и комплектующие изделия, требования к внешнему виду, патентоспособности и т.д.);
- технологических, обусловленных возможностями конкретного предприятия производящего РЭС, требованиями преемственности конструкций, допустимых видов технологических процессов и их стабильности, размерами программы выпуска, требованиями автоматизации и т.д.;
- эксплуатационных, связанных с местом установки РЭС и уровнями дестабилизирующих причин (механических, климатических, тепловых, радиационных, электромагнитных, технологического уровня ремонтной базы, квалификацией обслуживающего персонала, требованиями по ремонтпригодности конструкции, времени хранения, эксплуатации и т.д.).

нированных изменений информации в электронном документе после подписания электронных документов с момента формирования ЭЦП и подтвердить принадлежность ЭЦП владельцу.

³ **Аналог** (др.-греч. *ἀνάλογος* — соответственный, соразмерный) — объект (техническое решение) того же назначения, близкий по совокупности существенных признаков.

⁴ **Прототип** (греч. *prototypon* - прообраз) - наиболее близкий предшественник реальной реализации предлагаемого нового устройства или детали. Метод проектирования по прототипу заключается в использовании в новом изделии хорошо зарекомендовавших себя составных частей и/или конструктивных решений существующих изделий.

При компьютерном проектировании радиоэлектронных средств необходимо описание ещё не существующего разрабатываемого объекта на языке математики в виде, удобном для его алгоритмической реализации.

2.3 Математические модели (ММ) РЭС

Математической моделью называют совокупность математических объектов (чисел, переменных, матриц, множеств и т.п.) адекватно отображающая *некоторые* свойства РЭС и отношения между ними в виде уравнений, условий и ограничений и реализующая определённые математические методы по расчёту его характеристик. ММ считается адекватной, если отражает свойства объекта с необходимой точностью в заданных диапазонах изменения напряжений, температур, частот и т.п.

Результативность функционирования САПР в значительной степени зависит от математических моделей, на основе которых образовано их программное обеспечение. Разработчики РЭС могут и не знать многих особенностей построения САПР и реализованных в них методов. Тем не менее, зная алгоритмы и методы, реализованные в программах САПР, они могут проектировать быстрее, с наилучшим качеством и избегать многих ошибок в формулировке задач, выборе исходных данных, выборе стратегии проектирования, интерпретации результатов.

В процессе проектирования РЭС с помощью ИТ оперируют большим количеством математических моделей (ММ), отражающих свойства объекта, существенные с точки зрения проектировщика.

По внешнему виду ММ подразделяют на:

- аналитические ММ, которые имеют вид систем уравнений;
- алгоритмические ММ, в которых связи выходных параметров с внутренними и внешними параметрами выражают с помощью алгоритма решения, обычно на базе численного метода;
- имитационные ММ, отражающие поведение сложных РЭС при заданных (часто случайных) внешних воздействиях (например, работа радиолокационной станции). Это модели массового обслуживания, заданные в алгоритмической форме.

По характеру отображаемых свойств объекта выделяют:

- функциональные ММ, отражающие процессы функционирования;
- технологические ММ, отражающие процессы изготовления;
- структурные ММ, отображающие структурные свойства объекта.

В общем случае ММ можно представить в виде некоторого математического преобразования (2.1)

$$Z = F(X, Y), \quad (2.1)$$

где $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ – вектор N входных параметров, которыми может управлять проектировщик РЭС; $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_M\}$ – вектор M внешних параметров, характеризующих свойства внешней по отношению к проектируемому РЭС среды; $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_K\}$ – вектор K выходных параметров и показателей качества, характеризующих свойства РЭС; F – оператор преобразования, определяющий вид системы уравнений ММ), которая может

принимать вид различного вида систем линейных или нелинейных алгебраических уравнений, дифференциальных уравнений и т.п.

2.4 Маршрут проектирования

Алгоритм (маршрут) проектирования - это последовательность проектных процедур и элементарных проектных операций, ведущая к получению требуемых проектных решений.

Проектная процедура - формализованная совокупность проектных операций, направленных на достижение некоторой локальной цели, составляющих часть маршрута проектирования. Результатом выполнения проектной процедуры является принятие некоторого проектного решения.

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. Такой диалоговый режим проектирования сочетает творческие возможности и интеллект человека и такие достоинства компьютеров как высокое быстродействие, большие объёмы памяти, позволяющие хранить подробное, детальное представление о создаваемом объекте неопределённо долго и т.п.

2.5 Типовые проектные процедуры

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 электрическая схема устройства по заданным частотным или временным характеристикам.

Различают задачи синтеза структурного и параметрического. 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. В случае **параметрического синтеза** находятся числовые значения параметров элементов проектируемого объекта при известных структуре и условиях работоспособности.

Создаваемые в процессе синтеза проектные решения должны быть оформлены на языке оформления проектной документации, например, в виде чертежей, схем и пояснительного текста.

При проектировании РЭС задачи синтеза и анализа тесно взаимосвязаны. В процедурах синтеза разрабатываются, а в процедурах анализа оцениваются варианты построения РЭС. Каждое синтезируемое проектное решение сопровождается соответствующими задачами анализа характеристик объекта.

2.6 Оптимизация РЭС

2.6.1 Постановка задачи

Оптимизация — выбор наилучшего варианта из множества возможных. Задача оптимизации решается нахождением экстремума (минимума или максимума) целевой функции в некоторой области конечномерного векторного пространства, ограниченной набором линейных и/или нелинейных равенств и/или неравенств [27].

Целевая функция (критерий качества) $F(X)$ - это выражение, характеризующее качество проектируемого объекта. В зависимости от цели оптимизации необходимо найти её минимум или максимум, подобрав значения проектных параметров $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. Качество проектируемого РЭС может характеризоваться такими количественными показателями, как стоимость, прочность, масса, габариты, коэффициент полезного действия, надёжность, технологичность и т.п. С математической точки зрения целевая функция описывает некоторую $(n+1)$ -мерную поверхность (Рис. 2.1).

Проектными (управляемыми, варьируемыми) параметрами называются независимые переменные величины, которые полностью и однозначно количественно описывают объект проектирования. Например, это могут быть неизвестные значения размеров

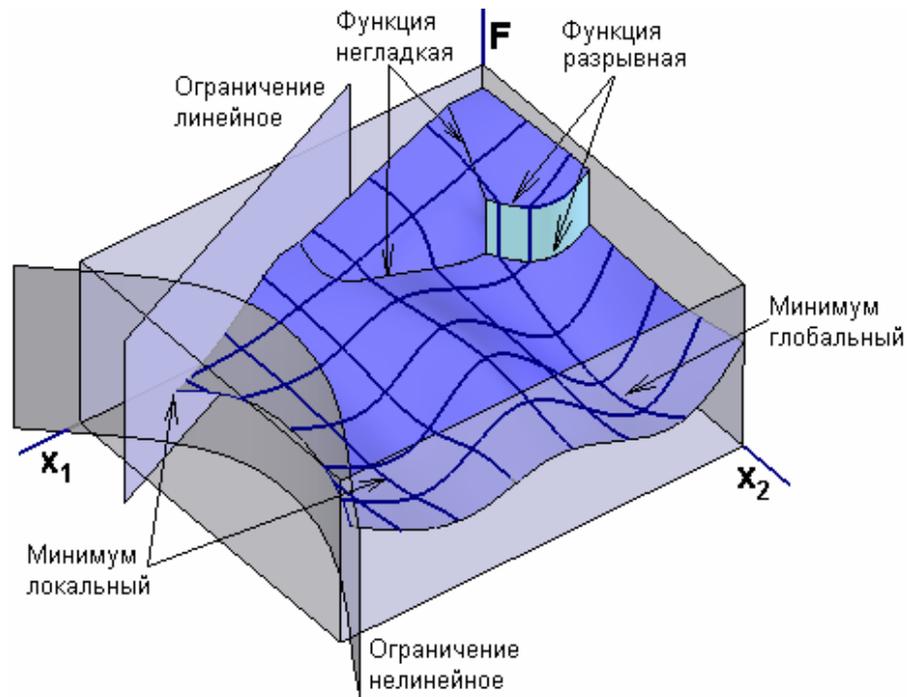


Рис. 2.1 – Поверхность отклика целевой функции при двух проектных параметрах

и формы объекта, параметров ЭРЭ, токов и напряжений в схеме электрической принципиальной, температуры и других свойств проектируемого изделия. Эти параметры изменяют в ходе оптимизации, чтобы улучшить характеристики аппаратуры и режимов работы её элементов. Обычно область допустимых решений целевой функции ограничена рядом условий, связанных с возможностями физической реализации проектных параметров.

Использование методов оптимизации. Методы оптимизации позволяют проектировщику на любом этапе создания РЭС провести оптимизацию узлов или изделия в целом по многочисленным функциональным, конструкторско-технологическим, эксплуатационным и экономическим показателям. Из-за наличия ограничений методы отыскания экстремальных значений целевой функции принципиально отличны от классических задач математического анализа. Теорию и методы решения задачи оптимизации изучает *математическое программирование* [27].

Как правило задачи структурного и параметрического синтеза решаются как **оптимизационные**. Вначале решается задача *структурной оптимизации*, а затем для выбранной структуры — задача *параметрической оптимизации*.

На схемотехническом этапе проектирования РЭС для выполнения инженерных расчётов используют разнообразные средства автоматизации различных инженерных задач (САЕ), обеспечивающие моделирование функционирования проектируемых изделий, проверки их работоспособности, прогнозирования длительности жизненного цикла, определения рабочих характеристик на этапе проектирования до изготовления опытных образцов [28,29,30,31].

2.6.2 Использование типовых проектных процедур при ИТ-проектировании РЭС

Чаще других могут быть использованы автоматизированные типовые процедуры:

- **структурного и параметрического синтеза** схемы электрической принципиальной;
 - **анализа статического режима** (расчёт значений фазовых переменных объекта в устойчивом состоянии, сводящийся к решению линейных или нелинейных систем алгебраических уравнений);
 - **анализа переходных (динамических) процессов**, при которых определяются зависимости фазовых переменных от времени при заданных значениях внутренних и внешних параметров, сводящийся к решению систем обыкновенных дифференциальных уравнений;
 - **анализа чувствительности** - оценка влияния изменения внутренних и внешних параметров на выходные, сводящаяся к расчёту коэффициентов чувствительности. Это позволяет исследовать влияние различных параметров на поведение целевой функции и управлять процессом поиска оптимального решения;
 - **частотного анализа** - получение амплитудно-частотных (**АЧХ**) и фазо-частотных характеристик (**ФЧХ**)⁵ с целью определения полосы пропускания, равномерности усиления и др.
 - **моделирования РЭС** в условиях повышенных и пониженных температур, изменения питающих напряжений и т.п.
 - **статистического анализа** - оценка закона и (или) основных статистических характеристик выходных параметров проектируемого объекта: плотности распределения этих параметров, математических ожиданий, дисперсий, коэффициентов корреляции и т.п. Вследствие неизбежных погрешностей технологического оборудования, влияния внешних факторов, разбросов параметров материалов и т.п. параметры элементов РЭС являются случайными величинами. С помощью вероятностных методов можно оценить влияние случайного разброса значений номиналов ЭРЭ на работоспособность проектируемого объекта, что позволяет предпринять меры для уменьшения этого влияния. Для определения разброса выходных параметров проектируемого объекта относительно номинальных значений также применяют **метод наихудшего случая**, позволяющий оценить влияние изменений внешних параметров на разброс выходных, так как нормальное функционирование объекта должно обеспечиваться при любых допустимых значениях внешних параметров.
- На этапе **конструкторского проектирования РЭС** важнейшими типовыми задачами CAD/CAM/CAE-систем являются:
- оптимальная компоновка (геометрическое размещение) компонентов нижестоящих уровней в монтажном пространстве вышестоящих уровней (ЭРЭ на ПП, ПП в функциональных модулях, модулей в блоках и т.д.), обеспечивающая заданную надёжность РЭС [32,33];
 - проектирование качественных электрических соединений [34,35,36,37,38,39,40,41,42,43];

⁵ **АЧХ** показывает, во сколько раз амплитуда сигнала на выходе системы отличается от амплитуды входного сигнала в заданном диапазоне частот, а **ФЧХ** используют для оценки фазовых искажений формы сложного сигнала, вызываемых неодинаковой задержкой во времени его отдельных гармонических составляющих при их прохождении по цепи.

- геометрическое твердотельное 3D-моделирование деталей, сборок, несущих конструкций [44,45,46,47,48];
- защита от дестабилизирующих факторов [48,49,50,51,52];
- обеспечение оптимального теплового режима в блоках с применением естественного, принудительного или смешанного охлаждения [53,54,55,56];
- обеспечение электромагнитной совместимости⁶ и помехоустойчивости совместно работающих электронных средств при воздействии естественных и искусственных помех, а также различного рода излучений [57,58].

2.7 Типовой маршрут проектирования

Поскольку проектирование РЭС как правило ведётся в условиях недостатка информации, то нередки ситуации, когда получают не реализуемые по тем или иным причинам решения. Достижения цели достигают путём *итерационного выполнения* одной и той же последовательности проектных процедур с необходимым уточнением структуры и численных значений проектных параметров (Рис. 2.2).



Рис. 2.2 - Схема типового алгоритма проектирования

⁶ **Электромагнитная совместимость (ЭМС)** (англ. *electromagnetic compatibility* — **EMC**) — это способность ЭС эффективно функционировать с заданным качеством в определённой электромагнитной обстановке, не создавая при этом недопустимых электромагнитных помех другим ЭС.

Каждую проектную процедуру целесообразно выполнять в следующей последовательности:

- 1) формирование частного технического задания;
- 2) генерация (структурный и параметрический синтез) возможных вариантов решения (комбинация сочетаний исходных факторов, ограничений и связей между ними);
- 3) анализ и оценка каждого варианта РЭС на соответствие ЧТЗ и выбора наилучшего;
- 4) принятие проектного решения, определяющего дальнейшие действия по результатам синтеза и анализа найденного варианта, возможность перехода к следующей проектной процедуре и оформление результатов.

2.8 Системный подход к проектированию конструкций РЭС

Одной из важнейших особенностей современных методов проектирования РЭС, подвергающихся всевозможным воздействиям дестабилизирующих факторов, позволяющих избежать односторонних ошибочных представлений и решений, является использование **системного подхода** [12,13].

Технические системы. В технике **система** означает сложную совокупность объектов, связей процессов, требований и ограничений, предназначенных для реализации заданных функций. Любое РЭС можно представить, как **систему** – совокупность взаимосвязанных разнородных модулей, совместно выполняющих заданные функции, решающих общую задачу в условиях взаимодействия с внешней средой, с учётом развития и противоречий. Типичными для систем свойствами обладают космические, связные и навигационные РЭС, радиолокационные комплексы (Рис. 2.3) [59], системы управления движущимися объектами, компьютеры и компьютерные сети и т.д.



Рис. 2.3 – Подсистемы комплекса радиолокационной разведки наземных и воздушных целей «АБАК-РЛС1М для ВВС Казахстана» [59]

Результатом функционирования системы является достижение определённой цели или множества целей. Радиоэлектронные системы характеризуются:

- высокой сложностью задач (конструкция РЭС состоит из большого числа устройств, узлов, блоков и компонентов);
- иерархической структурой конструкции (набор параметров системы любого иерархического уровня определяется системой верхнего уровня и в свою очередь служат исходными данными для системы расположенной уровнем ниже) с вполне определёнными физическими, геометрическими и кинематическими связями между элементами конструкции;
- наличием огромного числа допустимых вариантов решения;
- необходимостью учёта многообразных ограничений и влияющих факторов, дающая возможность конструкции нормально функционировать с заданными показателями, определяемыми техническими и эксплуатационными характеристиками;
- связью с внешней средой (в том числе и с человеком-оператором).

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 системы мы всё же получим сложный элемент, то этот элемент можно рассматривать как подсистему более низкого ранга, чем исходная система, и продолжить процесс декомпозиции до тех пор, пока части системы не станут элементарными, доступными для анализа и проектирования (Рис. 2.4).

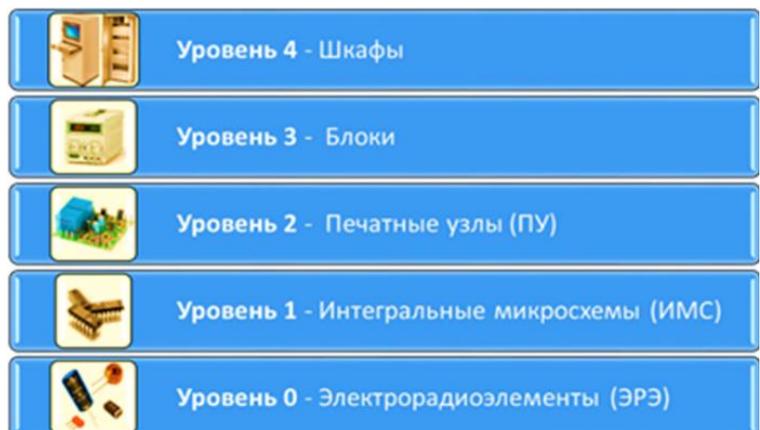


Рис. 2.4 - Число уровней иерархии системы зависит от класса аппаратуры и уровня технологии её изготовления

Успехи в микроминиатюризации РЭС приводят к сокращению числа иерархических уровней. Так использование СБИС⁷ 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. 2.5).

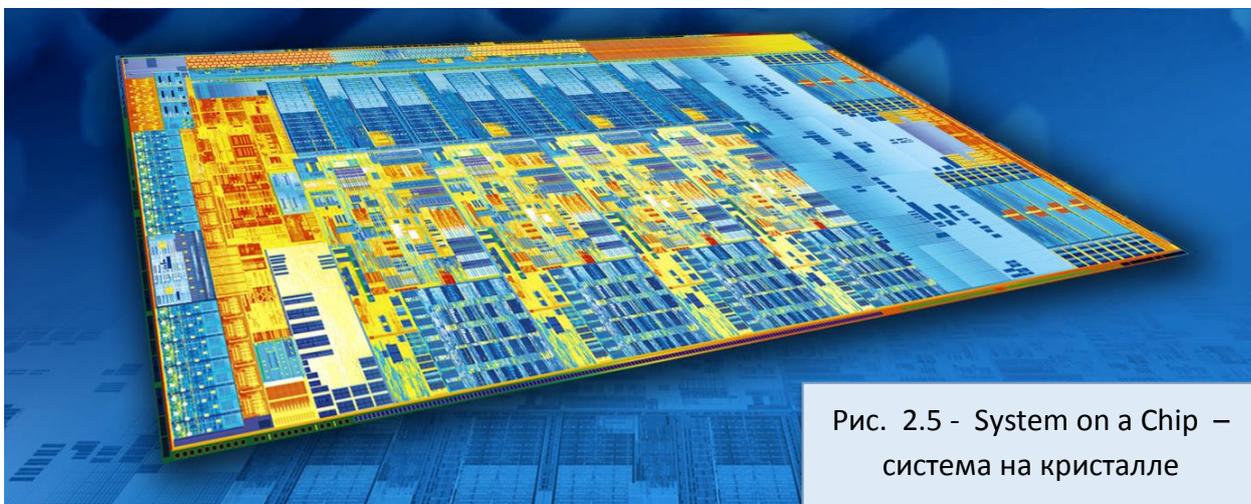


Рис. 2.5 - System on a Chip – система на кристалле

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.

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.

Модульное проектирование. Системный подход напрямую связан с широким использованием **базового метода проектирования РЭС** [32], в основу которого положено деление аппаратуры на **модули**.

Электронный модуль - функционально и конструктивно законченная составная часть радиоэлектронного средства или электронного устройства, реализующая функции преобразования электрических сигналов, выполненная на базе несущей конструкции⁸ и обладающая свойствами взаимозаменяемости [60]. Это иерархический элемент (Рис. 2.6), выполняющий в конструкции подчинённые функции, снабжённый элементами коммутации и механического соединения с подобными модулями и с модулями низшего уровня в РЭС [61]. Особенность модульных составных частей конструкции заключается в подчинении

⁷ **СБИС** – *Сверх Большая Интегральная Схема* (англ. *VLSI - Very Large Scale Integration*), количество элементов (компонентов) в которой может достигать нескольких миллиардов на одном кристалле.

⁸ **Несущая конструкция** 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.

их габаритов и присоединительных размеров установленным для такого проектного модуля определённым соглашениям по взаимозаменяемости, с тем чтобы он стал *унифицированным* или даже *стандартным* - способным применяться в аппаратуре различного назначения.

Представление конструкции РЭС в виде модулей низших уровней даёт возможность

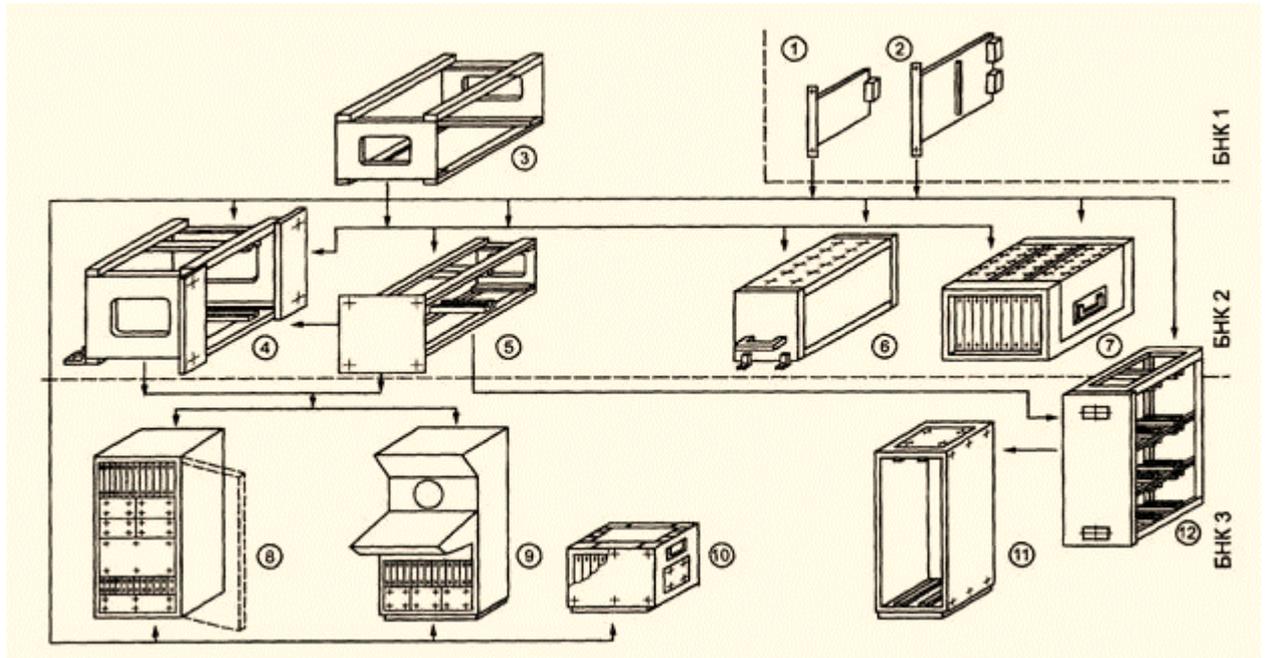


Рис. 2.6 – Иерархическая система построения базовых несущих конструкций (БНК) по ГОСТ Р 51623-2000

1, 2 - ячейки; 3 - корпус блока; 4 - блочный каркас; 5 - корпус вставного блока; 6 - корпус блока (авиационного); 7 - корпус контейнера (авиационного); 8 - корпус шкафа (стеллажа); 9 - корпус пульта; 10 - корпус моноблока; 11 - корпус шкафа для выдвижной стойки; 12 - выдвижная стойка

параллельного проектирования и производства составных частей изделия, что существенно сокращает сроки разработки и изготовления, что приносит существенный экономический эффект. Чем выше уровень унификации и чем более высокие структурные уровни модуль охватывает, тем большие возможности открываются для реализации модульного конструирования РЭС.

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 индика-

цией, 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.

Способы проектирования РЭС. 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, на практике часто 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 снизить 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.

2.9 ИТ и жизненный цикл РЭС

Стремительные темпы технического прогресса характеризуются ускоренной сменой моделей РЭС. При этом суммарные затраты на разработку и внедрение *новых моделей*, а также потери от морального износа должны быть минимальными, а уровень экономической эффективности максимальным. В большинстве проектных организаций в настоящее время существуют многочисленные САПР, АРМ, АСУТП и т.п., плохо согласующиеся друг с другом. Дальнейшее количественное развитие подобного подхода к автоматизации проектирования РЭС без интеграции ИТ малоперспективно. В то же время замена всех используемых информационных систем как правило нецелесообразна из-за громадных материальных затрат. Рациональнее создавать информационную инфраструктуру поддержки всего жизненного цикла (**ЖЦ**) изделий РЭС, в рамках которой существующие автоматизированные системы объединяются и интегрируются, а в случае необходимости дополняются новыми технологиями.

Основные этапы жизненного цикла изделий РЭС. В соответствии с международным стандартом качества продукции ISO 9000⁹ к основным этапам жизненного цикла изделий РЭС относятся следующие:

⁹ Российские национальные эквиваленты стандартов серии ISO 9000 - стандарты ГОСТ Р ИСО 9000, описывающие требования к системе менеджмента качества организаций и предприятий. В настоящее время вводится в действие новая версия стандартов: ГОСТ Р ИСО 9001-2015.

- 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.

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) (Рис. 2.7).

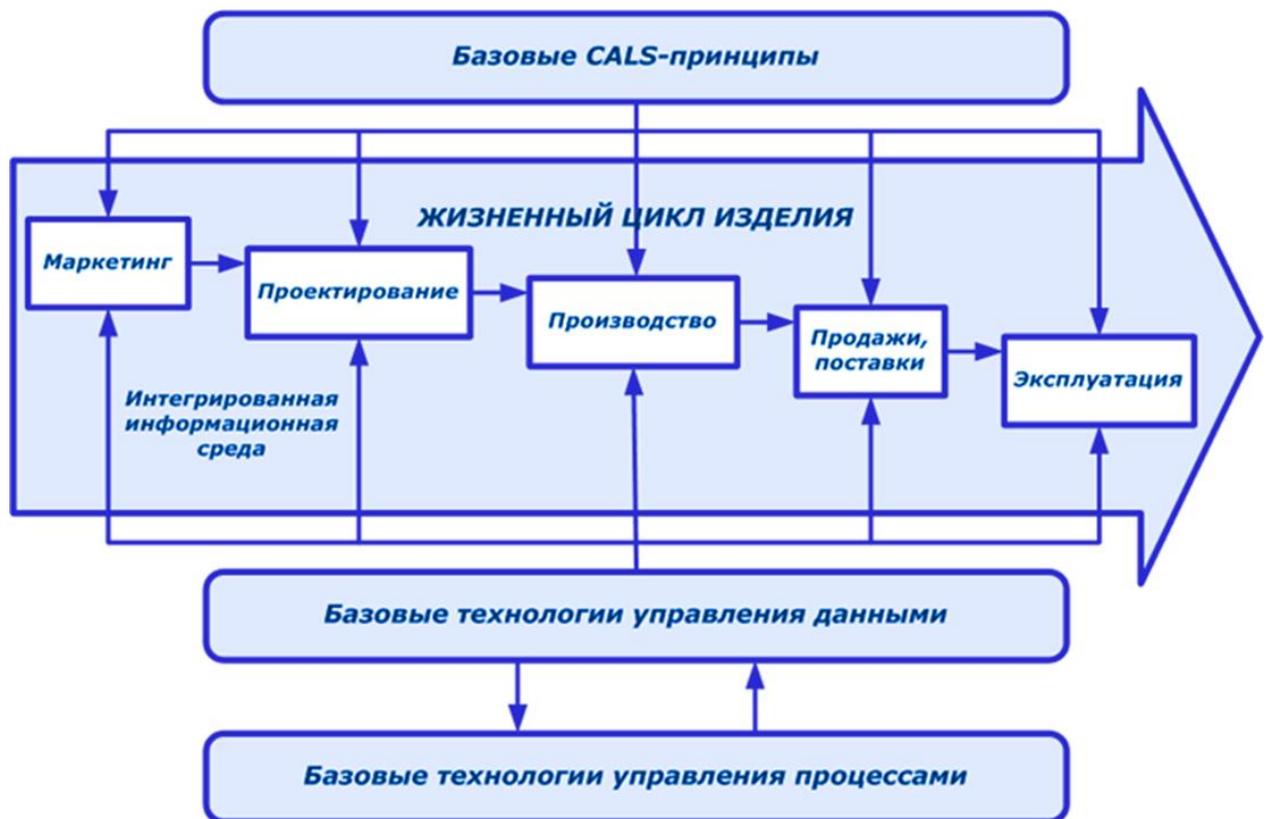


Рис. 2.7 – Концептуальная модель CALS

Такой подход к проектированию и производству РЭС на высокотехнологичных наукоёмких предприятиях заключается в использовании компьютерной техники и информационных технологий *на всех стадиях жизненного цикла изделия (ЖЦ)* для минимизации затрат в ходе жизненного цикла изделия, повышение его качества и конкурентоспособности (Рис. 2.8).

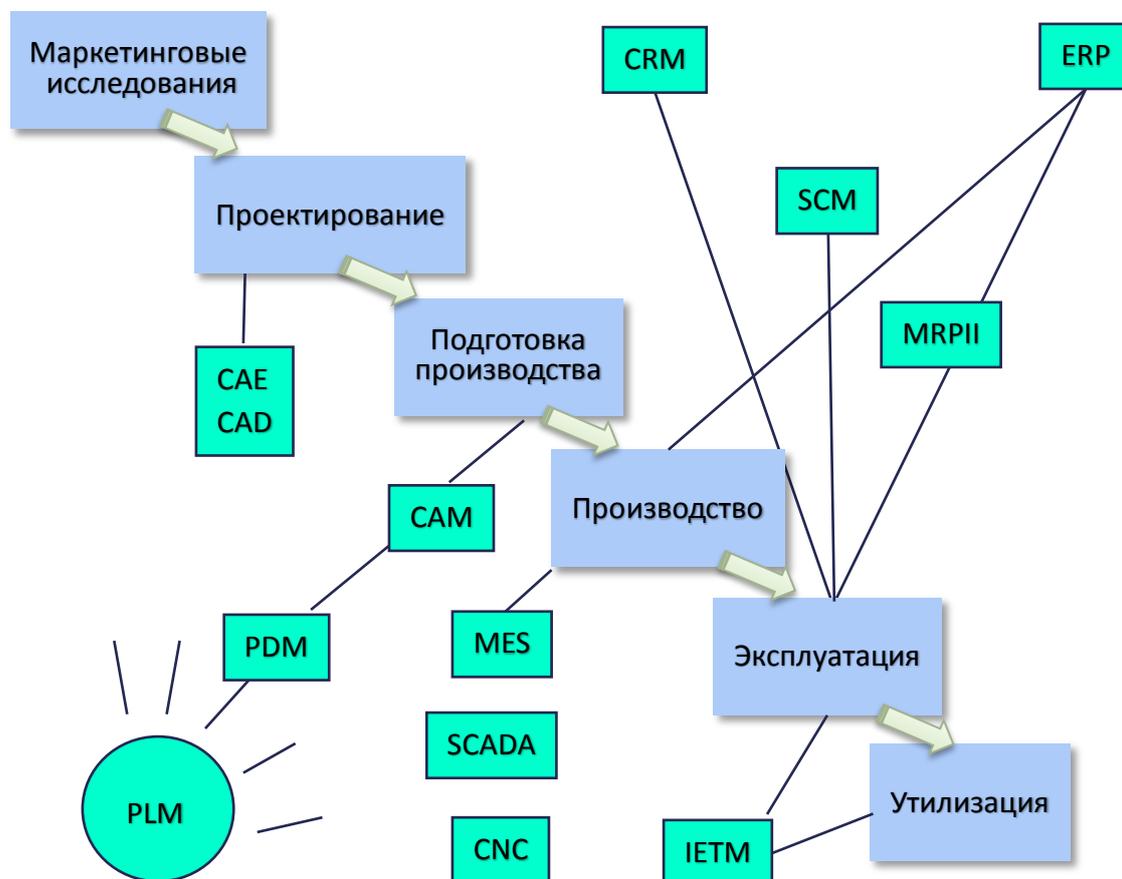


Рис. 2.8 - Применение технологии CALS на всех этапах жизненного цикла РЭС:

PLM-система — прикладное программное обеспечение для управления жизненным циклом продукции; **PDM**-система — система управления данными об изделии; **CAD/CAM/CAE** — средства автоматизации процесса проектирования/подготовки технологического процесса производства/инженерных задач; **CRM** - система управления взаимоотношениями с клиентами; **ERP** - организационная стратегия планирование ресурсов предприятия; **SCM** - управление цепями поставок; **MRPII** — система планирования потребностей в материалах; **MES** - система управления производственными процессами; **SCADA** - диспетчерское управление и сбор данных; **CNC** - числовое программное управление (ЧПУ); **IETM** - интерактивные электронные технические руководства (ИЭТР) — организационно-технические системы, предназначенные для автоматизированной подготовки сопроводительной документации в электронном виде.

Очевидно, что подобный учёт всех этапов жизненного цикла РЭС существенно усложняет задачу их проектирования, производства и эксплуатации, и эффективно решать её возможно только на основе ИТ. Важнейшая проблема построения технологии CALS -

обеспечение единообразного описания и интерпретации данных, независимо от места и времени их получения в общей системе. Подход CALS заключается в том, чтобы освободить пользователя от зависимости только от одного разработчика. Структура проектной, технологической и эксплуатационной документации, языки её представления должны быть стандартизированными. В этом случае становится реальной успешная работа над общим проектом различных коллективов, разделённых во времени и пространстве и использующих разные САПР. Одна и та же конструкторская документация может быть использована многократно в разных проектах, а одна и та же технологическая документация — приспособлена к многообразным производственным условиям, что позволяет существенно сократить и удешевить общий цикл проектирования и производства.

В последнее время за рубежом наряду с CALS для обозначения процесса управления полным циклом изделия — от его концепции, через проектирование и производство до продаж, послепродажного обслуживания и утилизации используется также термин **PLM (Product Lifecycle Management)** - управление жизненным циклом продукции. В отличие от подхода CALS, основанном на применении международных стандартов единого представления данных, PLM-технология обеспечивает решение задач с помощью набора взаимосвязанных программных продуктов только *одного крупного разработчика программного обеспечения*.

К **базовым принципам CALS** относятся:

- системная информационная поддержка жизненного цикла изделия на основе использования *интегрированной информационной среды (ИИС)*, обеспечивающей минимизацию затрат и трудоёмкости процессов технической подготовки и освоения новых изделий, сокращение сроков вывода на рынок новых конкурентоспособных изделий;
- информационная интеграция за счёт стандартизации информационного описания объектов управления, обеспечивающая единообразные способы управления процессами и информационного взаимодействия всех участников ЖЦ, резкое сокращение брака и затрат, связанных с уменьшением количества ошибок и переделок в конструкции;
- разделение программ и данных на основе стандартизации структур данных и интерфейсов доступа к ним, ориентация на готовые *коммерческие программно-технические решения* (англ. *Commercial Of The Shelf - COTS*), соответствующие требованиям стандартов;
- безбумажное представление информации в виде электронных документов, использование электронно-цифровой подписи;
- параллельный инжиниринг (англ. *Concurrent Engineering, CE*), обеспечивающий комплексную параллельную разработку сложных проектов несколькими рабочими группами, что существенно сокращает время разработок. Возможность применения принципов CE появляется вследствие того, что все результаты работы представлены в стандартном электронном виде, являются актуальными, доступными всем участникам и могут быть легко скорректированы;
- непрерывное совершенствование **бизнес-процессов**.

Интегрированная информационная среда современных CALS-технологий представляет собой совокупность распределённых баз данных, содержащих в виде информационных объектов сведения об изделиях, производственной среде, ресурсах и процессах предприятия, обеспечивающая корректность, актуальность, сохранность и доступность данных для всех участников независимо от места и времени их получения. Информационная интеграция состоит в том, что все САПР, применяемые на разных этапах жизненного цикла, оперируют не с традиционными документами и даже не с их электронными отображениями (например, отсканированными чертежами), а с формализованными информационными моделями, описывающими РЭС, технологии его производства и эксплуатации. **Информационный объект** в таком едином информационном пространстве – это совокупность данных и программного кода, обладающая свойствами (атрибутами) и методами, позволяющими определённым образом интерпретировать и обрабатывать проектную, технологическую и эксплуатационную документацию.

Независимо от типа CAD/CAM/CAE-систем одна и та же конструкторская документация может быть использована многократно в разных проектах, а одна и та же технологическая документация — приспособлена к разным производственным условиям. В этом случае разные коллективы разработчиков, разделённые как в пространстве, так и во времени, могут успешно работать над общим проектом, что позволяет существенно сократить и удешевить общий цикл проектирования, производства и эксплуатации РЭС. Большим достоинством CALS-технологий является лёгкость распространения передовых проектных решений, возможность многократного воспроизведения частей проекта в новых разработках и т.д.

Информационная поддержка при использовании технологии CALS реализуется в соответствии с требованиями системы международных стандартов STEP¹⁰ (англ. *STandard for Exchange of Product model data* — стандарт обмена данными модели изделия) в качестве универсальных форматов данных, регламентирующих правила указанного взаимодействия преимущественно посредством электронного обмена данными, электронной технической документации [23]. Стандарты STEP обеспечивают единообразное описание и интерпретацию данных в САПР на всех этапах жизненного цикла РЭС.

Использование интегрированной информационной среды обеспечивает единообразные способы управления процессами и взаимодействия всех участников жизненного цикла (заказчиков РЭС, поставщиков и производителей РЭС, эксплуатационного и ремонтного персонала) применение технологии CALS позволяет существенно сократить объёмы проектных работ (описания многих составных частей РЭС, проектировавшихся ранее, хранятся в унифицированных форматах данных, доступных любому пользователю технологий CALS), сэкономить финансовые, материальные и временные затраты при изготовлении РЭС и повысить их конкурентоспособность. Значительно облегчается решение проблем ремонтпригодности, интеграции продукции в различные рода системы и среды, приспособления к меняющимся условиям эксплуатации, специализации проектных организаций и т.п.

¹⁰ Российские стандарты серии ГОСТ Р ИСО 10303 [23] являются аутентичными переводами соответствующих международных стандартов STEP.

Системы управления проектными данными. Для решения проблем совместного функционирования компонентов САПР различного назначения, координации работы систем CAE/CAD/CAM, управления проектными данными и проектированием разрабатываются системы, получившие название систем управления проектными данными PDM (англ. *Product Data Management*), которые либо входят в состав модулей конкретной САПР, либо имеют самостоятельное значение и могут работать совместно с разными САПР.

Системы управления материальными потоками. Для минимизации затрат, существенного сокращения времени поставок, эффективного контроля и управления движением материальных, информационных и финансовых ресурсов (необходимых компонентов, материалов, сырья, продукции), в практике хозяйственной деятельности в настоящее время используются логистический подход.

На большинстве этапов жизненного цикла РЭС, начиная с определения предприятий-поставщиков исходных материалов и компонентов и кончая реализацией продукции, требуются услуги *системы управления цепочками поставок* — **SCM** (от англ. *Supply Chain Management* - управление цепями поставок), позволяющей определить цепь продвижения материального потока от компаний-поставщиков к компаниям-потребителям характеризующуюся минимальными издержками.

Координация работы множества предприятий-партнёров с использованием интернет-технологий возлагается на системы электронной коммерции, часто выделяемые в класс систем управления данными в интегрированном информационном пространстве — **CPC** (от англ. *Collaborative Product Commerce* - Совместная торговля продукцией). **Системы поддержки производства.** Во второй период жизненного цикла включается освоение изделия в промышленном производстве, включающее подготовку производства, изготовление установочной серии и квалификационные испытания. На этой стадии нередко возникают и конструкторские изменения, и изменения в технологических процессах, и изменения уровня оснащённости производства специальными видами оснастки и оборудования.

Информационная поддержка этапа производства продукции осуществляется автоматизированными системами управления предприятием (АСУП) и автоматизированными системами управления технологическими процессами (АСУТП). В состав АСУТП входят специализированные ИТ типа **SCADA** (англ. *Supervisor Control And Data Acquisition* — диспетчерское управление и сбор данных), выполняющая диспетчерские функции (сбор и обработку данных о состоянии оборудования и технологических процессов) и помогающие разрабатывать программное обеспечение для встроенного оборудования.

Для непосредственного программного управления технологическим оборудованием используют системы **CNC** (англ. *Computer Numerical Control* - числовое программное управление, ЧПУ), которые встроены в технологическое оборудование. К АСУП относятся интегрированные системы планирования ресурсов предприятия **ERP** (англ. *Enterprise Resource Planning*, планирование ресурсов предприятия), выполняющие различные бизнес-функции, связанные с планированием производства, закупками, сбытом продукции, анализом перспектив маркетинга, управлением финансами, персоналом, складским хозяйством, учётом основных фондов и т.п.), системы планирования производства **MRPII, SCM-**

системы. Системы MRPII ориентированы, главным образом, на бизнес-функции, непосредственно связанные с производством. SCM и MRP II могут быть реализованы как подсистемы ERP.

Системы поддержки реализации, эксплуатации и утилизации продукции. На этапе реализации продукции выполняются функции управления отношениями с заказчиками и покупателями, проводится анализ рыночной ситуации, определяются перспективы спроса на планируемые изделия, возлагаемые на систему **CRM** (англ. *Customer Relationship Management* - система управления взаимоотношениями с клиентами), в которых упор делается на взаимоотношении компания - клиент, и в частности на удержании старых клиентов на основе учёта их индивидуальных потребностей и особенностей.

Важнейшим этапом жизненного цикла является эксплуатация разработанной продукции в соответствии с её назначением и модернизация её (при необходимости). Так как информация о спроектированном РЭС продолжает храниться в интегрированной информационной среде, то её модернизация не вызывает особых затруднений.

Экологи грозят штрафными санкциями производителям электроники, если те не предусмотрят меры по утилизации РЭС, персональных компьютеров, сотовых телефонов и других электронных средств. После разборки они содержат все виды отходов, в том числе вредные для жизни и здоровья человека вещества (например, ртуть, свинец и т.д.). С другой стороны, драгоценные металлы, цветные, черные металлы, полимеры и т.п. могут быть использованы повторно. Обычно утилизация выполняется специализированными предприятиями, имеющими лицензию на подобную работу.

Предприятиям было бы экономически выгодно продлить второй период жизненного цикла изделия на максимальный срок, однако этот период не беспределен. Новая продукция с момента её появления обеспечивает социально-экономический эффект только до определённого времени, после которого она морально стареет и становится неконкурентоспособной.

2.10 Стадии разработки конструкторской документации при проектировании с помощью ИТ

Единые требования (нормы, правила) по порядку разработки, оформления и обращения конструкторской документации (чертежей, схем, текстовых документов), разрабатываемых и применяемых на всех стадиях и этапах жизненного цикла изделия (проектирование, изготовление, эксплуатация, ремонт и др.) определяются комплексом взаимосвязанных стандартов единой системы конструкторской документации (ЕСКД).

В первый период жизненного цикла изделия входит полный комплекс работ по созданию новой техники. ГОСТ 2.103-2013 [62] и ГОСТ Р 15.201-2000 [63] устанавливают стадии разработки конструкторской документации изделий всех отраслей промышленности и этапы выполнения работ в том числе и с использованием ИТ (Таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Этапы проектирования РЭС

Стадии разработки	Этапы выполнения работ
<p>Маркетинговые исследования</p>	<p>В ходе маркетинговых исследований собирается информация о нуждах и предпочтениях потребителей в создаваемой РЭС, определяются актуальность в её разработке с параметрами, удовлетворяющими потребителей, о конкурентах, о структуре рынка и тенденциях его развития и т.п.</p> <p>Маркетинговые исследования позволяют создать информационно-аналитическую базу, необходимую для принятия управленческих решений и оценки их результативности.</p>
<p>Техническое задание (ТЗ) - исходный документ на проектирование РЭС. В ТЗ излагаются цель, 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, предписание по выполнению необходимых стадий создания документации (конструкторской, технологической, программной и т.д.) и её состав после выполнения каждого этапа, а также специальные требования.</p>	<p>В соответствии с ГОСТ 2.103-2013 Техническое задание к стадиям разработки не относится.</p> <p>При разработке ТЗ разработчик должен учитывать информацию об аналогичной продукции.</p> <p>ТЗ является юридическим документом — как приложение включается в договор между заказчиком и исполнителем на проведение проектных работ и является его основой. Это позволяет заказчику требовать от исполнителя соответствия изделия всем условиям, оговорённым в ТЗ, а исполнителю — отказаться от выполнения работ, не указанных в ТЗ. Все изменения, дополнения и уточнения формулировок ТЗ обязательно согласуются с заказчиком и им утверждаются.</p> <p>Разработка ТЗ может проводиться и в ходе выполнения научно-исследовательской работы (НИР) [64], включающей проведение патентных исследований по ГОСТ Р 15.011-96 [65] в рассматриваемой предметной области, проверку новых идей и изобретений в ходе опытно-экспериментальных работ, выбор оптимального технического решения и т.п.</p>

Стадии разработки	Этапы выполнения работ
<p>Техническое предложение (ГОСТ 2.118-2013) [66] - совокупность конструкторских документов (с литерой «П»), которые должны содержать уточнённые технические и технико-экономические обоснования целесообразности разработки изделия.</p> <p>Требования по анализу договора (контракта) приведены в 4.3 ГОСТ Р ИСО 9001. Разрабатывается в случае, если это предусмотрено техническим заданием.</p>	<p>Изучение и анализ технического задания и выявление дополнительных или уточнённых требований к изделию (технических характеристик, показателей качества и др.), которые не могли быть указаны ранее в техническом задании.</p> <p>Рассматриваются различные варианты возможных решений с учётом конструктивных и эксплуатационных особенностей разрабатываемого и существующих изделий, проверку вариантов на патентную чистоту и конкурентоспособность. Выполняется сравнительная оценка рассматриваемых вариантов по таким показателям качества как надёжность, технологичность, экономичность, эргономичность, уровни стандартизации, унификации, соответствие вариантов требованиям техники безопасности, производственной санитарии и др. Выбирается оптимальный вариант изделия.</p> <p>Подбор основных материалов, комплекующих изделий, элементной базы и т.д.</p>
<p>Эскизный проект [67] (ГОСТ 2.119-2013) - работы 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.</p> <p>Оформляется в виде совокупности конструкторских документов со степенью детализации, характерной этой стадии разработки.</p> <p>В комплект КД эскизного проекта следует включать проектные КД с литерами «Э».</p>	<p>Выполнение вариантов возможных решений, анализ особенностей вариантов (характеристики вариантов составных частей и т.п.), их конструкторская проработка. Глубина такой проработки должна быть достаточной для сопоставления рассматриваемых вариантов. Предварительное решение вопросов упаковки, транспортирования и эксплуатации изделия.</p> <p>Разработка и обоснование технических решений, направленных на обеспечение показателей надёжности, установленных ТЗ и техническим предложением.</p> <p>Оценка изделия на технологичность по показателям стандартизации и унификации и правильность выбора средств и методов контроля (испытаний, анализа, измерений).</p>

Стадии разработки	Этапы выполнения работ
<p>Эскизный проект разрабатывают, если это предусмотрено техническим заданием или протоколом рассмотрения технического предложения.</p>	<p>Оценка изделия на соответствие требованиям эргономики, технической эстетики. При необходимости, для проверки принципов работы изделия и/или его составных частей, установления эргономических, эстетических характеристик изделия и для удобства сопоставления различных вариантов по этим характеристикам изготавливают и испытывают материальные макеты и (или) разрабатывают электронные макеты.</p> <p>Проработка чертежа общего вида - электронной модели сборочной единицы.</p>
<p>Технический проект [68] (ГОСТ 2.120-2013) - совокупность работ, необходимых для обеспечения предъявляемых к изделию требований и позволяющие получить полное представление о конструкции разрабатываемого изделия, оценить его соответствие требованиям ТЗ, технологичность конструкции, степень сложности изготовления, способы упаковки, возможности транспортирования и монтажа на месте эксплуатации, удобство эксплуатации, целесообразность и возможность ремонта и т.д. На стадии технического проекта не повторяют работы, проведённые на предыдущих стадиях, если они не могут дать дополнительных данных.</p> <p>Технический проект после согласования и утверждения в установленном порядке служит основанием для разработки рабочей КД.</p>	<p>Разработка конструктивных решений изделия и его основных частей с учётом защиты от механических, климатических и радиационных воздействий и т.д.</p> <p>Выполнение всех необходимых расчётов, принципиальных схем, схем соединений и др.</p> <p>Анализ на технологичность и уточнение конструкции изделия с учётом особенностей технологии производства на предприятии-изготовителе, обеспечение заданного в ТЗ уровня стандартизации и унификации, соответствие требованиям экономики, технической эстетики</p> <p>При необходимости изготовление и испытание материальных макетов или разработка и анализ электронных макетов, проведение испытаний на соответствие ТЗ в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9001.</p> <p>Оценка технического уровня и качества изделия, проверка соответствия применяемых решений требованиям техники безопасности и производственной санитарии.</p> <p>Выпуск комплекта конструкторской и технологической документации на все элементы, узлы, блоки и устройства РЭС с присвоением документам литеры «Т».</p>

Стадии разработки	Этапы выполнения работ
<p>Разработка КД опытного образца (опытной партии) изделия</p>	<p>Разработка КД, предназначенной для изготовления и испытания опытного образца (опытной партии) изделия, без присвоения литеры.</p> <p>Изготовление и предварительные испытания опытного образца опытной партии) изделия.</p> <p>Корректировка КД по результатам изготовления и предварительных испытаний опытного образца (опытной партии) изделия с присвоением КД литеры «О».</p> <p>Приёмочные испытания опытного образца (опытной партии) изделия</p> <p>Корректировка КД по результатам приёмочных испытаний опытного образца (опытной партии) изделия с присвоением КД литеры «О»</p> <p>Корректировка КД с присвоением им литеры «О₁», «О₂». ...«О_n».</p>

В последующем осуществляется технологическая подготовка производства, выпуск установочной серии и организация серийного (или массового) выпуска РЭС. Организация серийного и массового производств возможна либо за счёт наращивания производственных мощностей (экстенсивный путь развития производства, характерный для его ранних стадий), либо за счёт внедрения новых технологий и методов организации производства, автоматизации и механизации технологических процессов (интенсивный путь развития, характерный для современного производства).

На каждой проектной стадии оформляется техническая документация, являющаяся исходной для выполнения последующих этапов, причём требования к их составу и содержанию устанавливаются государственные стандарты. Тем не менее жёсткого обязательного деления на этапы проектирования и их содержание чаще всего не существует. Конкретные этапы работ могут существенно меняться в зависимости от назначения РЭС и их сложности, остроты потребности в изделии, предыстории данного вида РЭС, существующих аналогов, технических заделов разработчика, возможностей производства, включая финансовые, перспектив обеспечения конкурентоспособности на рынке и т.д.

Виды и комплектность конструкторских документов установлены ГОСТ 2.102-2013 [24]. Заметим, что все текстовые и двумерные (2D) КД могут быть выполнены как бумажный КД и/или как электронный КД, причём документы одного вида и наименования независимо от выполнения являются равноправными и взаимозаменяемыми. Все графические документы (чертежи, схемы) могут быть выполнены как электронные чертежи (2D) и/или как электронные модели (3D). Допустимы электронные модели деталей, сборочных единиц.

3 Системы автоматизированного проектирования

3.1 Технологии проектирования РЭС

На Рис. 3.1 приведены возможные технологии проектирования РЭС.



Ручное проектирование

- выполняется человеком без применения компьютера



Автоматизированное проектирование

- часть работ выполняется с использованием компьютера, а часть – вручную



Автоматическое проектирование

- все необходимые проектные процедуры выполняются на компьютере без вмешательства человека

Рис. 3.1 - Технологии проектирования РЭС

Недостатки ручного проектирования:

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

Автоматическое проектирование на сегодняшний день в большинстве случаев не реализуемо из-за чрезвычайной сложности исчерпывающей формализации многих проектных процедур, трудностей в принятии проектных решений при большом числе критериев оценки и в условиях значительной неопределённости.

В начале 70-х годов появилось понятие - «**автоматизированное проектирование**» или проектирование с помощью компьютера, используемое для обозначения широкого спектра компьютерных инструментов, помогающих инженерам создавать проекты на основе ИТ. Практическая реализация целей автоматизированного проектирования осуществляется в рамках **САПР** - **Систем Автоматизированного Проектирования** (англ. *Computer-Aided Design, CAD*). При использовании такого подхода проектные процедуры разумно выполнять с помощью компьютера, а разработчику настраивать их на поиск лучшего технического решения, участвовать в оценке вариантов по многим показателям качества, принимать проектные решения в сложных, неоднозначных ситуациях. Диалоговый (интерактивный) режим проектирования сочетает творческие возможности и интеллект человека и та-

кие достоинства компьютеров как высокое быстродействие, большой объем памяти, позволяющий хранить подробное, детальное представление об объекте неопределенно долго и т.д.

При автоматизированном проектировании РЭС сохраняются многие положения и принципы традиционного проектирования:

- применение блочно-иерархического подхода,
- деление процесса проектирования на этапы, а представлений об объекте - на уровни абстрагирования,
- итерационное повторение некоторых этапов проектирования и т.д.

САПР - это организационно-техническая система (Рис. 3.2), состоящая из совокупности комплекса средств автоматизации проектирования и коллектива специалистов подразделений проектной организации, выполняющая автоматизированное проектирование объекта, которое является результатом деятельности проектной организации.



Рис. 3.2 - Типовые подсистемы (обеспечения) САПР

3.2 Комплексные (интегрированные САПР)

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 сквозных САПР, охватывающих все этапы проектирования РЭС, пока ещё не создано. Тем не менее, существует немалое количество САПР, реализующих значительную часть проектных процедур проектирования РЭС [46]. Возможные варианты комплексирования нескольких САПР, обеспечивающих решение большинства из стоящих перед проектировщиком РЭС задач, могут включать рассмотренные ниже САПР.

3.3 САПР геометрического проектирования деталей и сборок РЭС (MCAD)

3.3.1 «Solid Works» – система инженерного 3D-моделирования



Одной из популярнейших САПР среднего уровня с развитыми возможностями конструкторского и технологического синтеза, а также динамического моделирования деталей и сборок в трёхмерном пространстве (3D проектирования) является [Solid Works](#) [44,45,46,47,48].

С помощью *Solid Works* можно создавать документы следующих типов:

- детали (изготавливаются из однородного материала без применения сборочных операций);
- сборки (изделия, состоящего из нескольких деталей с заданным взаимным положением);
- схемы (специальные виды сборки, иллюстрирующие процессы соединения компонентов в сборке, на основе которых можно создавать презентации, показывающие последовательность сборки сложного изделия);
- чертежи (графические документы, содержащие графическое изображение изделия, основную надпись, рамку, иногда дополнительные объекты оформления (технические требования и др.);
- оснастку для литья пластмассовых изделий;
- детали из листового материала (в отличие от модели обычной детали содержит специализированные команды моделирования);
- сварные детали (содержат команды моделирования сварных швов).

Solid Works реализует сквозной процесс проектирования (Рис. 3.3) и способен стать ядром интегрированного комплекса автоматизации предприятия, с помощью которого осуществляется поддержка изделия на всех этапах жизненного цикла, инженерного анализа и подготовки производства изделий любой сложности и назначения.

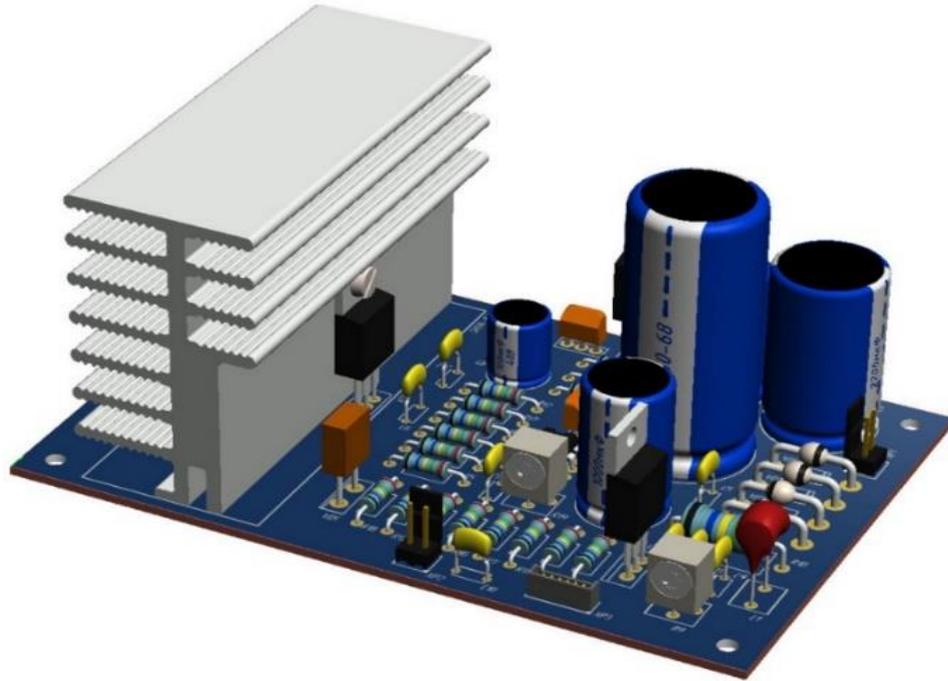


Рис. 3.3 - Печатный узел, разработанный в САПР *Solid Works*

Успех внедрения *Solid Works* на отечественных предприятиях обеспечен интуитивно понятным интерфейсом, русификацией, возможностью создания электронной интерактивной конструкторской документации в соответствии со стандартами ЕСКД [69], поддержкой лёгкого импорта и экспорта в формате других известных САПР. Многие появившиеся позже САПР подобного класса во многом подражают классическому интерфейсу и организации *Solid Works*. Здравая маркетинговая политика *SolidWorks Corporation* позволяет приобретать высшим учебным заведениям учебные программные комплексы по символическим ценам, что также способствует широкому распространению продуктов корпорации.

Solid Works - мощное средство проектирования, предоставляющее проектировщику ЭЭС реальные средства для создания прототипов, сборок, проверки динамики поведения изделий. Использование параметрических размеров в *Solid Works* помогает так построить модель-прототип, что изменение конструкции становится простой задачей изменения размеров. Базы данных по физическим свойствам материалов, текстур и штриховок, допусков и посадок, а также стандартных элементов (крепежа, резьбы, зубчатых колёс, стандартных деталей и узлов, элементов листовых деталей, типовых профилей прокатного сортамента и т.п.) позволяют быстро и легко создавать трёхмерные модели деталей, сборочных единиц, генерировать 2D-чертежи.

Редактор деталей *Solid Works* обеспечивает создание твердотельной геометрии тела, поверхностей и объёмных эскизов. Пользователь может использовать инструменты построения линий, дуг, эллипсов, сплайнов, многочисленные способы установления взаимосвязей между ними и создания сопряжений. В качестве плоскости построения эскизов

могут быть использованы базовые координатные плоскости, произвольные плоскости, определённые самим пользователем, либо ранее построенные плоские грани. По созданному эскизу строится объём детали или поверхность с помощью выдавливания или протягивания контура с различными конечными условиями, в том числе на заданную длину или вдоль другого контура. Возможно также вращение контура вокруг заданной оси, либо по заданным контурам с использованием нескольких образующих. Сложные детали можно формировать последующим добавлением и/или вычитанием тех или иных простых тел. Дополнительно можно использовать инструменты создания фасок, скруглений постоянного и переменного радиуса, отверстий сложной формы, сопряжения поверхностей, преобразования поверхности-заготовки из листового материала в 3D-деталь, формируемую путём её гибки и т.д.

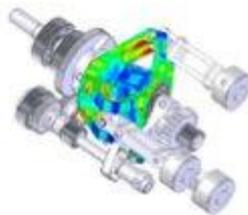
Редактор сборок позволяет построить сборку из уже готовых деталей. Для деталей нужно лишь задать положение их в пространстве и добавить ограничения подвижности в соответствии с выполняемыми ими в изделии функциям. При проектировании сборок можно задавать всевозможные условия взаимного расположения деталей, автоматически контролировать зазоры и отсутствие взаимного пересечения деталей.

Параметры последовательности операций по созданию деталей и сборок хранятся в дереве построений, которое отображается также в виде иерархической структуры. Чтобы отредактировать какой-либо элемент, нужно выбрать его в дереве построений, модифицировать, и эти изменения автоматически распространятся вниз по дереву построений.

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.

COSMOSWorks

Design Validation
Made Simple



Дополнительный модуль инженерного анализа *SolidWorks Simulation Professional (COSMOSWorks)* [48,70] включает расчёты на прочность конструкций в упругой зоне, постановку и

решение контактных задач, расчёт сборок, определение собственных форм и частот колебаний, расчёт конструкции на устойчивость, усталостные расчёты, имитация падения, тепловые расчёты (Рис. 3.4).

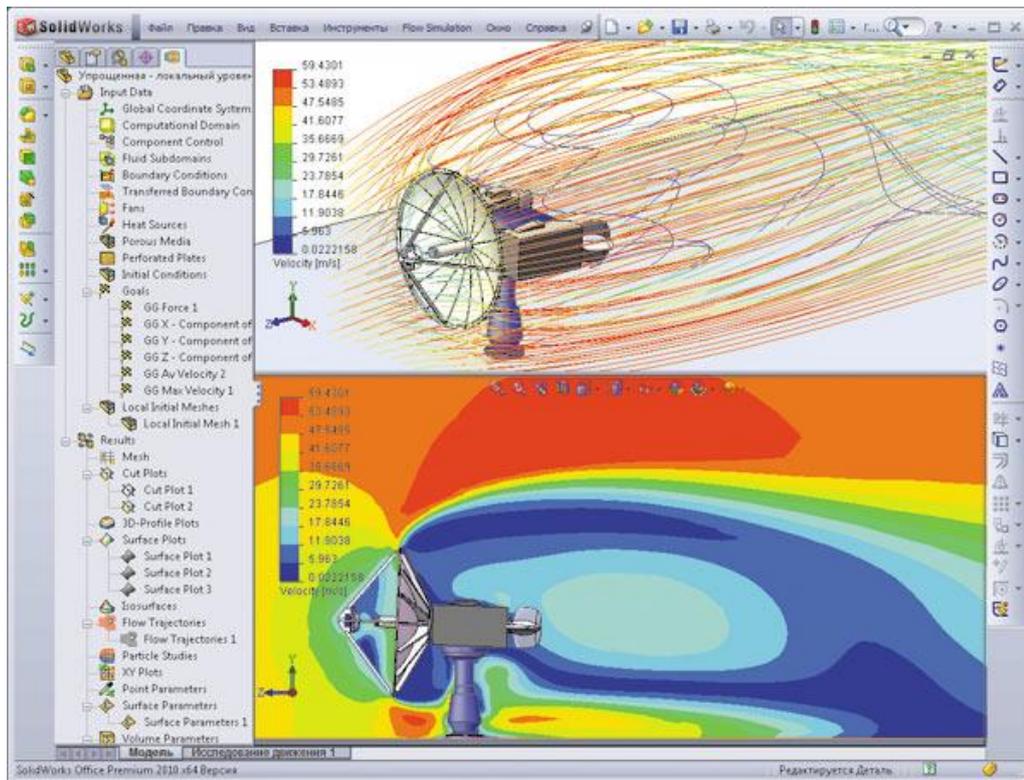


Рис. 3.4 - Анализ воздушного потока, обтекающего радиолокатор, с помощью *SolidWorks Simulation Professional*



Ещё один дополнительный модуль *SolidWorks Flow Simulation Electronic Cooling Module Add-In* [70] предназначен для теплового расчёта электронных устройств (Рис. 3.5).

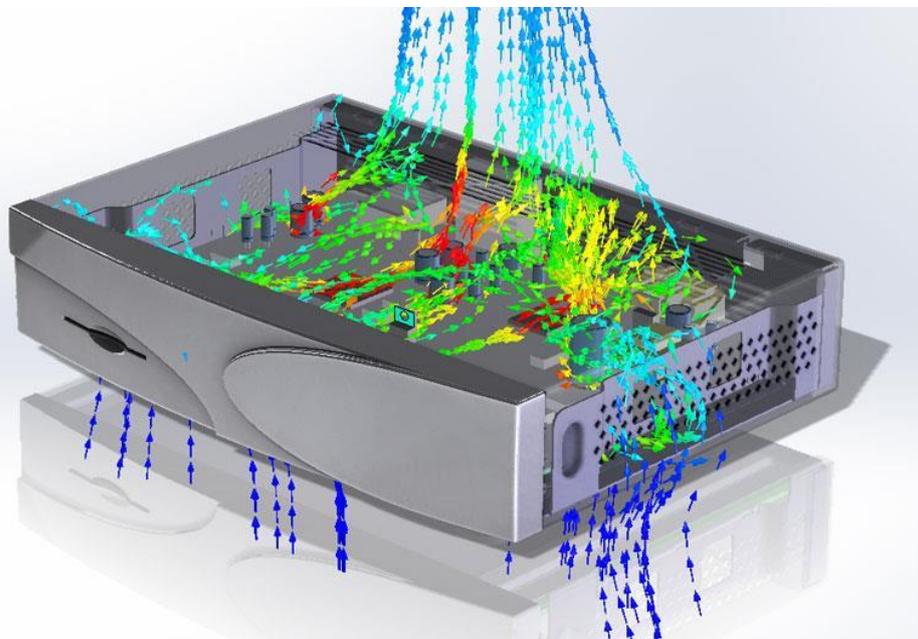


Рис. 3.5 - Моделирование тепловых потоков в блоке ПЭС в *SolidWorks Flow Simulation Electronic Cooling Module Add-In*

Он включает расширенную базу данных по виртуальным вентиляторам, материалам электротехнического назначения и т.п.

Дополнительный модуль *Solid Works SWR-Электрика* [45] позволяет объединить электрическую и механическую части проекта в единой среде проектирования *Solid Works* (Рис. 3.6).

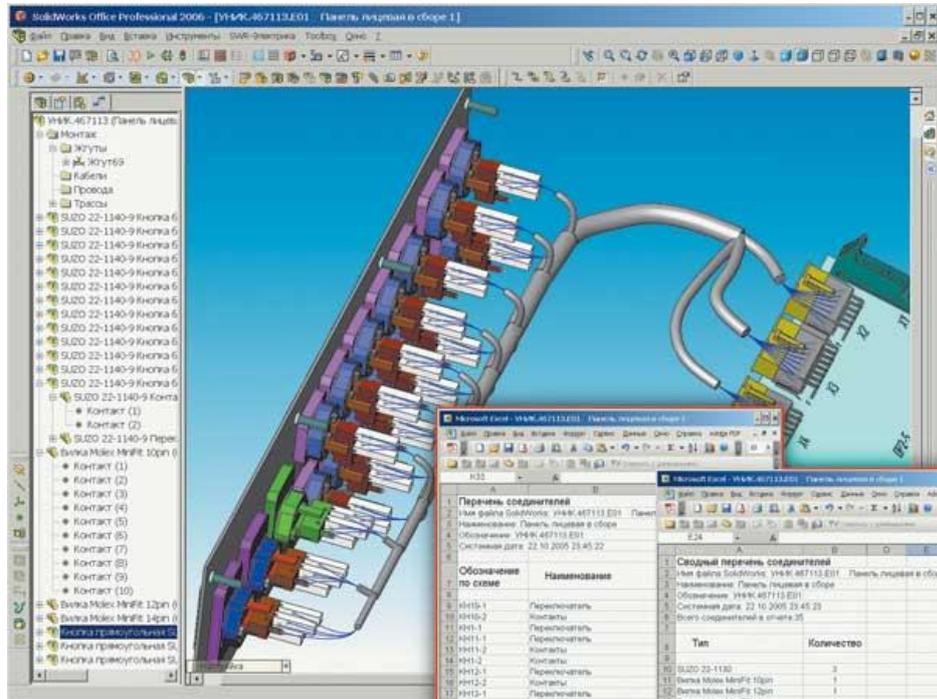


Рис. 3.6 - Проектирование проводного монтажа с помощью модуля *Solid Works SWR-Электрика*

Он обеспечивает моделирование проводных соединений между контактами с использованием пополняемой библиотеки соединителей (Рис. 3.7) и различных материалов - проводов, многожильных кабелей, изоляционных трубок, экранирующих плетёнок и так далее. На основе выполненного проекта монтажа модуль автоматически генерирует полную информацию об использованных материалах и выполненных соединениях.



Рис. 3.7 - Фрагмент библиотеки соединителей

3.3.2 Система трёхмерного твердотельного и поверхностного параметрического проектирования Autodesk Inventor



3D-САПР [Autodesk Inventor](#) [46,71] 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 (Рис. 3.8).

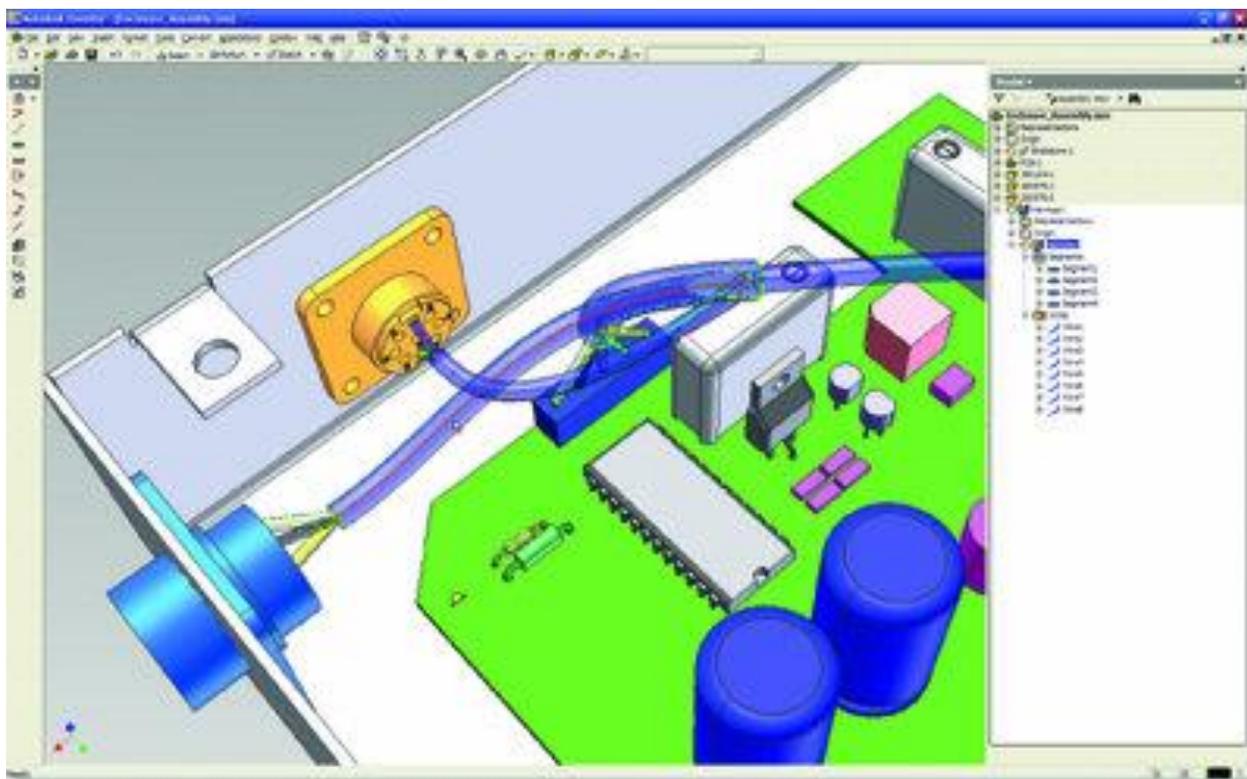


Рис. 3.8 – Автоматизированное 3D-проектирование кабелей, жгутового и проводного монтажа в среде *Autodesk Inventor*

Динамическое электронное макетирование, реализованное в *Inventor*, помогает испытывать продукцию в действии ещё до изготовления опытного образца.

Главным конкурентом системы *Autodesk Inventor* является *Solid Works*. По своим возможностям САПР *Inventor* и *Solid Works* близки. *Autodesk Inventor* позволяет вести разработку таких же видов чертежей, что и *Solid Works* (см. подраздел 3.3.1).

В основе обеих САПР лежит технология трёхмерного параметрического моделирования, то есть моделирования с использованием параметров элементов модели, изменяя которые, возможно просмотреть различные конструктивные схемы. Это позволяет сосредоточиться на функциональности сборки, а не на размерах составляющих её деталей.

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.

С помощью *Autodesk Inventor* можно интегрировать 2D-данные в единую виртуальную модель продукта. Проверка геометрии, оценка прочности и функциональности осуществляется на виртуальной модели ещё до запуска реального изделия в производство.

Как и *Solid Works*, *Autodesk Inventor* открытая система. Внешние партнёры *Autodesk Inventor* добавили многие дополнительные функции.

К достоинствам системы *Autodesk Inventor* относят более полную совместимость с широко распространённым форматом DWG программы *Autodesk AutoCAD*, дающую возможность использования двумерных параметрических элементов для создания новых трёхмерных моделей. *Autodesk Inventor* может поддерживать импорт и экспорт файлов для таких приложений, как *CATIA*, *UGS*, *SolidWorks*, *ANSYS* и др.

Многие пользователи отмечают более удобный интерфейс у *Solid Works*, так же как и более эффективные расчётно-аналитические модули, например, модуль анализа напряжений.

3.3.3 «Компас» — отечественная САПР трёхмерного проектирования, позволяющая оформлять конструкторскую документацию по стандартам ЕСКД



Российской компанией «АСКОН» [72] разработан «Компас» — семейство программ автоматизированного трёхмерного твердотельного проектирования для различных отраслей с возможностями оформления проектной и конструкторской документации в полном соответствии со стандартами серии ЕСКД [46,72].

Система «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. 3.9). Все они ассоциированы с моделью: изменения в модели приводят к изменению изображения на чертеже.

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.

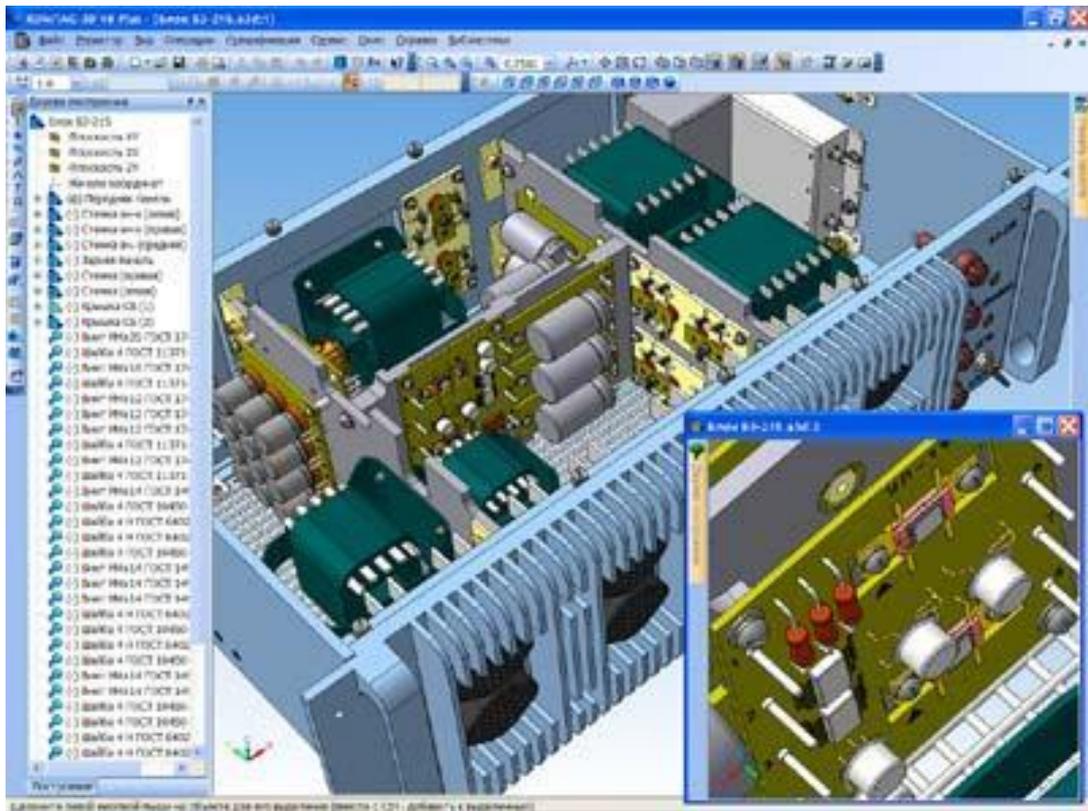


Рис. 3.9 - Проектирование РЭС в САПР *Компас*

Возможности системы КОМПАС-3D обеспечивают проектирование машиностроительных и приборостроительных изделий любой сложности и в соответствии с самыми передовыми методиками проектирования. В системе присутствуют инструменты для работы по методу «сверху вниз», а также методу «снизу вверх».

КОМПАС-3D обеспечивает поддержку наиболее распространённых форматов 3D-моделей (STEP, ACIS, IGES, DWG, DXF), что позволяет организовывать эффективный обмен данными с организациями, использующими в работе любые CAD / CAM / CAE-системы.

К сожалению, в КОМПАС-3D возможности динамического моделирования тепловых, механических и других полей пока ещё уступают SolidWorks.

3.3.4 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://Dassault_Systemes)», позволяющая обеспечить параллельное проведение конструкторско-производственного цикла крупных изделий система для описания изделия и его моделирования на разных этапах жизненного цикла [73,74].

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 в аэрокосмической, автомобильной, судостроительной, машиностроительной областях, электроники и товаров широкого потребления, строительства заводов, реинжиниринга¹¹ (Рис. 3.10).

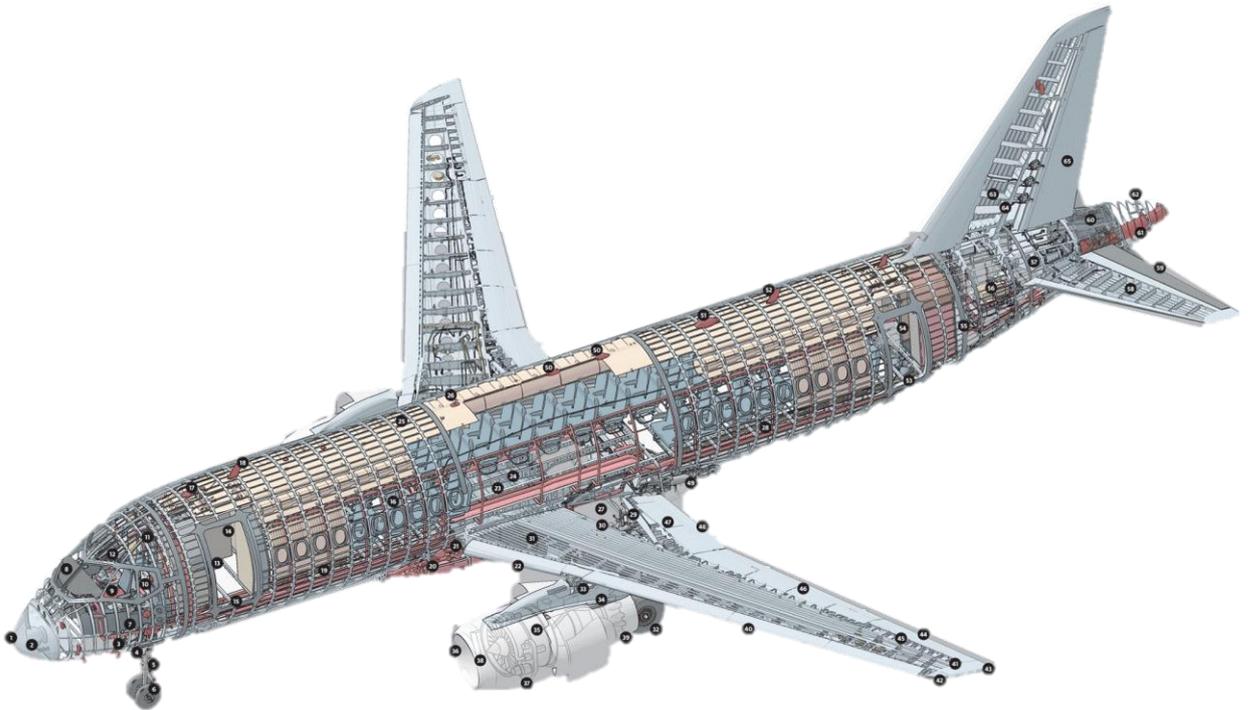


Рис. 3.10 - Применение САПР CATIA в авиации (схема самолета Суперджет (SSJ-100))

Это комплексная система автоматизированного проектирования (CAD), технологической подготовки производства (CAM) и инженерного анализа (CAE), включающая в себя передовую инструментарию трёхмерного моделирования, подсистемы программной имитации сложных технологических процессов, развитые средства анализа и единую базу данных текстовой и графической информации. В основу системы CATIA заложены идеи PLM (технологии управления жизненным циклом изделий), что позволяет исключительно быстро развивать и наращивать её функциональность в желаемом направлении. В этом её основное отличие от других программных продуктов.

В CATIA 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;

¹¹ **Реинжиниринг (обновление)** - деятельность по модернизации ранее реализованных технических решений на действующем объекте.

- автоматический анализ геометрических и логических конфликтов сложных сборок;
- трассировку систем коммуникаций с соблюдением заданных ограничений;
- технологическую подготовку производства.

В настоящее время CATIA занимает около 70% мирового рынка систем автоматизированного проектирования и технологической подготовки производства в авиакосмической промышленности и более 45% -- в автомобилестроении.

К сожалению, стоимость CATIA слишком высока для её использования небольшими отечественными фирмами и предприятиями.

3.4 САПР проектирования печатных узлов

3.4.1 САПР P-CAD



Среди российских разработчиков печатных узлов огромную популярность приобрела мощная система автоматизированного проектирования печатных узлов радиоэлектронных и вычислительных устройств P-CAD фирмы *Personal CAD Systems, Inc.* (позднее австралийской компании [Altium](#)) [34,35,36,37,38,39], дающий полное комплексное программное решение для проектирования печатных плат (Рис. 3.11). Программа способна выполнить весь цикл разработки печатных узлов, интерактивное размещение элементов и автотрассировку проводников, поиск ошибок на любой стадии проекта, подготовку документации, проверку целостности всех сигналов, анализ перекрёстных искажений.

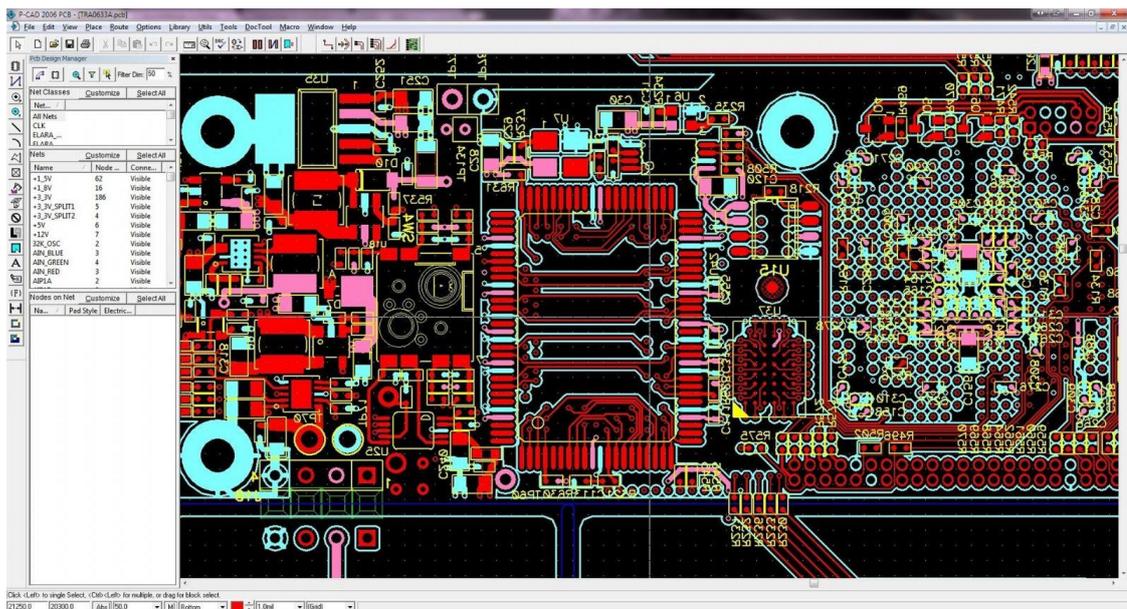


Рис. 3.11 - Проектирование печатных плат в P-CAD 2006

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 взаимодей-

ствующие средства проектирования, удобную для пользователя оболочку и интеллектуальную базу данных, обширную интегрированную библиотеку электрорадиоэлементов, диалоговые редакторы, средства сопряжения с популярными средствами анализа.

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.

3.4.2 САПР Altium Designer

**Altium
Designer**

В 2008 году фирма [Altium](http://www.altium.com) заявила о прекращении поддержки и поставки P-CAD, и предложила разработчикам для автоматизированного проектирования, отладки и выполнения комплектной документации использовать более совершенную комплексную САПР радиоэлектронных средств - *Altium Designer* [40,41,42].

В отличие от P-CAD, работа над всеми частями проекта ведётся в единой управляющей оболочке *Design Explorer* (Рис. 3.12).

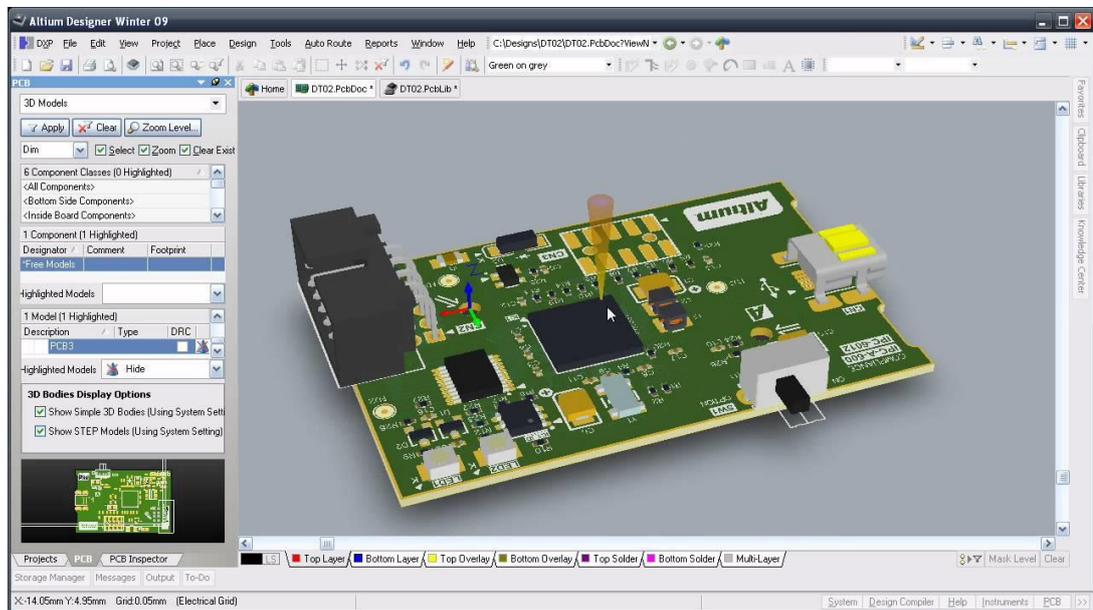


Рис. 3.12 - Проектирование печатных узлов в *Altium Designer*

Altium Designer позволяет разработчику создавать проекты высокоскоростных электронных устройств на базе печатных плат и ПЛИС (программируемых логических интегральных схем), начиная от принципиальной схемы и VHDL-описания¹² ПЛИС, проводить моделирование полученных схем и VHDL-кодов, готовить файлы для производства.

Цифро-аналоговое моделирование учитывает почти все реальные параметры и предоставляет в распоряжение конструктора огромное количество различных анализов,

¹² VHDL (англ. VHSIC - Very high-speed integrated circuits) - Hardware Description Language — базовый язык описания аппаратуры интегральных схем современных вычислительных систем.

включая анализы переходных процессов, частотный, шумов, передаточных функций, *Фурье*, методом *Monte-Carlo*, с изменением значений температуры.

Редактор печатных плат *Altium Designer* содержит мощные средства интерактивного размещения компонентов и трассировки проводников, максимально упрощают процесс разработки электроники. Инструменты трассировки учитывают все требования, предъявляемые современными технологиями разработок, например, при трассировке дифференциальных пар или высокочастотных участков плат.

Библиотеки *Altium Designer* содержат более 90 тысяч готовых компонентов, у многих из которых имеются модели посадочных мест, *SPICE*¹³ и *IBIS*¹⁴-модели, а также *трёхмерные модели*, причём имеется возможность импорта уже готовых библиотек из *PCAD 2000-2006*.

В *Altium Designer* полностью поддерживаются все наработки в виде схем, плат и библиотек, разработанные в последних версиях *P-CAD*. 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. 3.13) уже на этапе создания принципиальной схемы. Контроль целостности проекта позволяет отслеживать изменения в частях проекта и синхронизировать их.



Рис. 3.13 - Макетная отладочная плата NanoBoard 3000 для проектирования ПЛИС от компании Altium

В состав программы входит автоматический трассировщик *Situs* [75], который позволяет трассировать ПП с высокой плотностью компоновки ЭРЭ и прокладывать печатные проводники по неортогональным направлениям с интеллектуальным выбором слоёв.

¹³ **SPICE-модели** - универсальные модели компонентов электронных схем, используемые в большинстве программ схемотехнического моделирования. Вначале эти модели разрабатывались применительно к программе **SPICE** (англ. *Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*), а впоследствии – SPICE-модели стали стандартом и в других САПР моделирования электрических схем, чему способствовала *открытость исходных кодов*. К сожалению, многие крупные фирмы стараются сохранить в тайне информацию о принципиальных электрических схемах новых разработок микросхем, тем более с характеристиками пассивных и активных элементов. В технической документации на микросхемы они лишь иногда приводят структурную схему, которая мало что практически даёт для составления SPICE-моделей, что существенно осложняет их разработку.

¹⁴ **IBIS-модель** (англ. *Input Output Buffer Information Specification*) — метод представления информации о буферах ввода-вывода интегральной микросхемы, позволяющий моделировать работу интегральной схемы, не включая подробности этого процесса. IBIS модели часто используются вместо SPICE-моделей для проверки целостности сигнала и сокращения времени моделирования.

В настоящее время в *Altium Designer* появилась возможность двунаправленной передачи информации (импорт/экспорт) о механических деталях и моделях компонентов в формате **STEP**¹⁵ в механические САПР (например, *Solid Works*).

Altium Designer постоянно 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.

3.4.3 САПР OrCAD/Allegro



рования (Рис. 3.14) [43].

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/Allegro - мощный пакет высокопроизводительных компьютерных программ компании [Cadence Design Systems](http://www.cadence.com) [76], предназначенный для создания электронных версий печатных плат для производства печатных плат, а также для производства электронных схем и их модели-

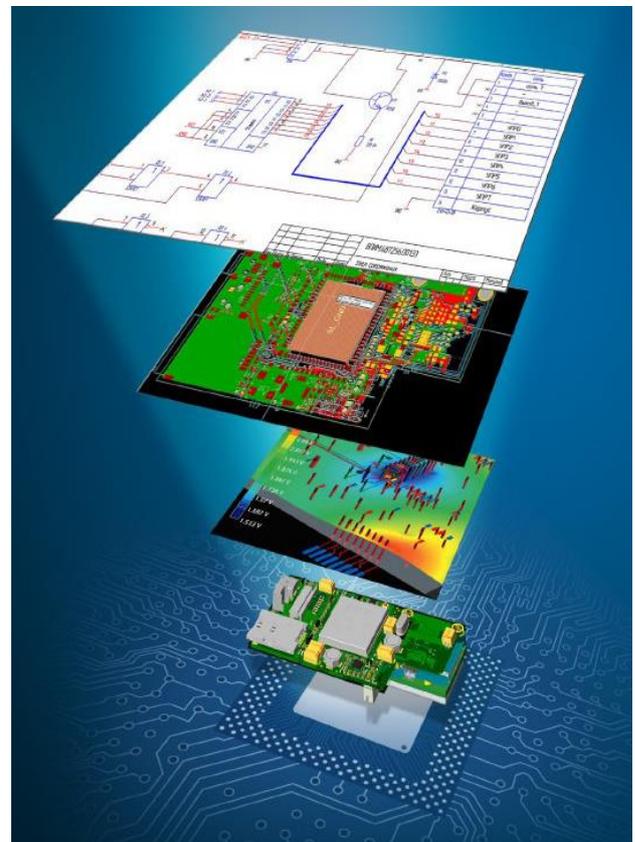


Рис. 3.14 - Маршрут проектирования печатных узлов в OrCAD: от идеи до готового решения

¹⁵ Файл с расширением **STEP** представляет собой файл трёхмерной модели. Он служит для обмена данными (механическая и электрическая схема, геометрические размеры и допуски и другие) с САПР *КОМПАС*, *Autodesk Inventor Fusion* и другими.

– *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

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 можно сравнить с ожидаемыми результатами. Моделирование задержек позволяет определить задержки распространения сигналов и проверить, что временные характеристики микросхем не меняют логику проекта.

3.4.4 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. 3.15) пакет *Expedition PCB* (40% мирового и 50% европейского рынка САПР печатных плат) [77].

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 маршрутом проектирования *FPGA*¹⁶ (ПЛИС);
- интеграцию с системой моделирования и анализа целостности сигналов, перекрёстных помех и электромагнитной совместимости;
- поддержку технологии высокоплотных межсоединений (*HDI*), скрытых микропереходов (*microvia*), встроенных пассивных компонентов;
- интеграцию с системой теплового моделирования;

¹⁶ **FPGA** (от англ. *Field-Programmable Gate Array* - Программируемая Пользователем Вентильная Матрица, **ППВМ**), — полупроводниковое устройство, которое может быть сконфигурировано производителем или разработчиком после изготовления; отсюда название: «программируемая пользователем». ППВМ программируются путём изменения логики работы принципиальной схемы, например, с помощью исходного кода на языке проектирования (типа VHDL), на котором можно описать эту логику работы микросхемы

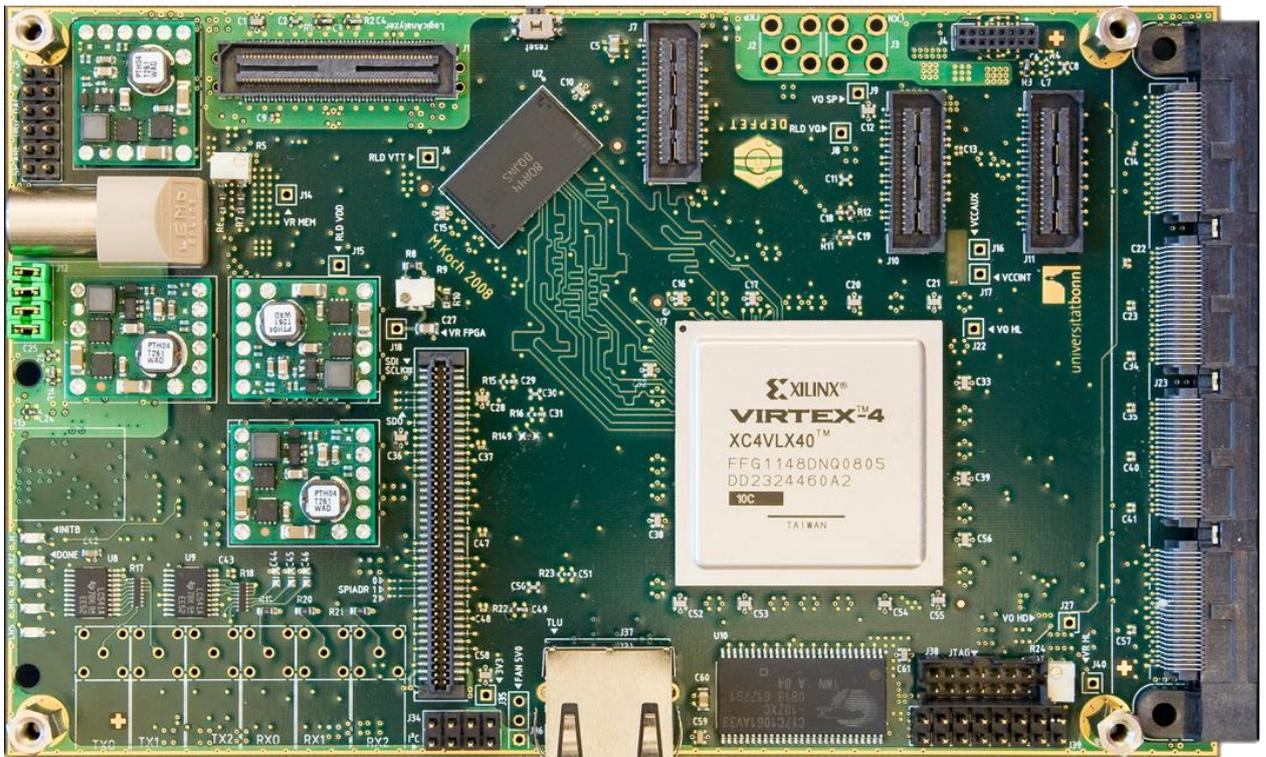


Рис. 3.15 - Проектирование печатных плат в *Mentor Graphics*

– 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.

3.4.5 САПР *ТороR*



Среди перспективных САПР печатного монтажа следует отметить топологический трассировщик *ТороR* (*Topological Router*) [78,79] российской компании Эремекс, позволяющий трассировать не только двухсторонние, но и многослойные печатные платы.

Метод гибкой трассировки, реализованный в *ТороR* отличается от других методов отсутствием жесткой фиксации каждой из прокладываемых трасс, создающей часто совершенно необоснованные препятствия для других, ещё не проложенных трасс (Рис. 3.16). Автоматическая топологическая трассировка соединений выполняется в произвольных направлениях, не ограничиваясь углами 90° и 45°, и может выполняться ломаными линиями или даже дугами.

Уникальный алгоритм *ТороR* существенно уменьшает длину проводников и занимаемую ими площадь на платах, а также количество межслойных переходов при автотрассировке. *ТороR* отлично взаимодействует с другими САПР, среди которых *PCAD 2000-2006*, *Altium Designer* и другие.

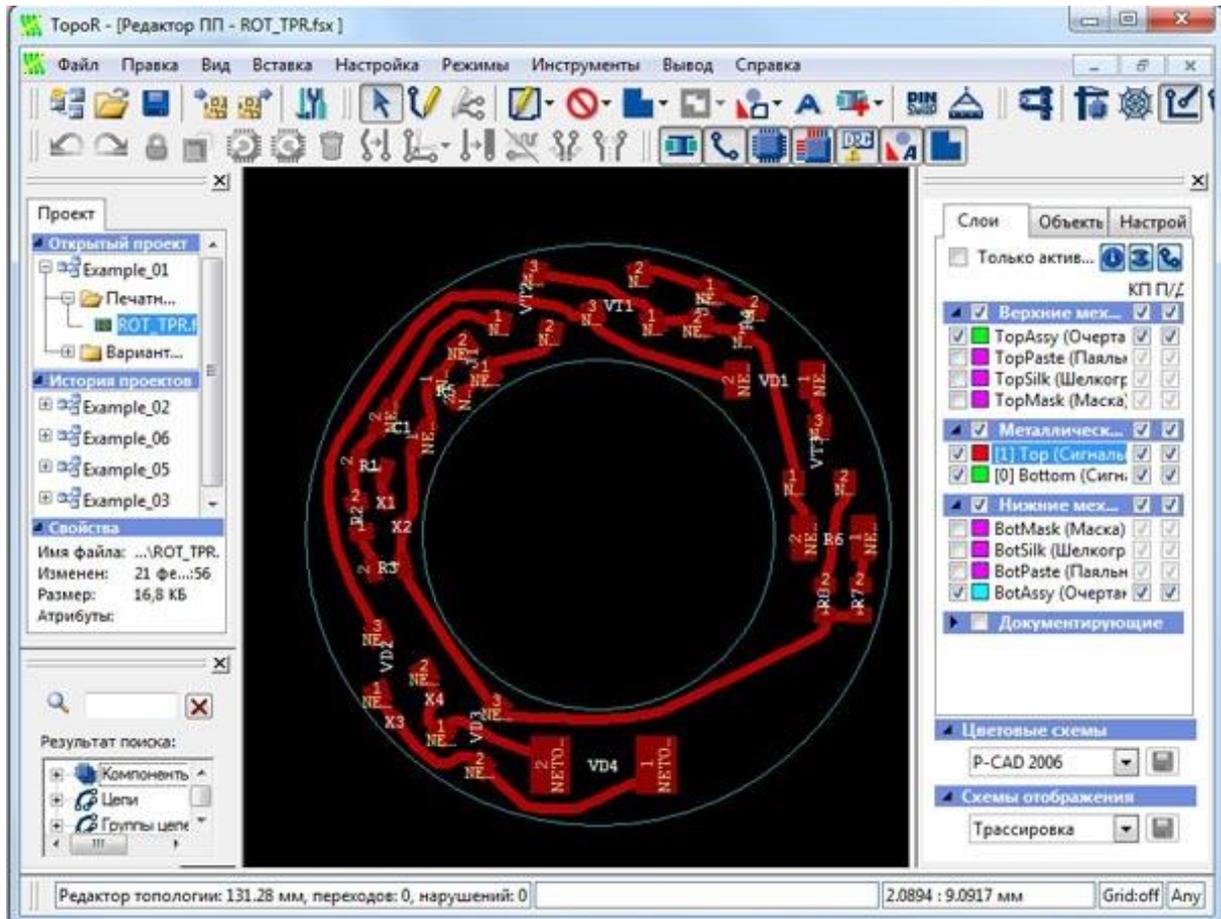


Рис. 3.16 - Проектирование печатных плат с помощью топологического трассировщика *TopoR*

3.4.6 САПР DipTrace



Dip Trace - это полнофункциональная САПР компании Novarm [80,81] для сквозного проектирования печатных плат и схмотехнической документации (от идеи до файлов для производства) с интуитивно-понятным пользовательским интерфейсом для проектов любой сложности. DipTrace соответствует большинству требований как начинающих, так и опытных разработчиков печатных узлов. Встроенный учебник содержит пошаговые рекомендации, охватывающие все этапы создания печатной платы.

DipTrace включает редакторы схем, плат, компонентов и их корпусов, в том числе и 3D-редактор корпусов:

- *DipTrace Schematic Capture* - редактор принципиальных схем. Поддерживает многолистовые и многоуровневые иерархические схемы и позволяет без затруднений создавать связи между выводами визуально и логически, по именам, без соединений, с помощью сетевых портов и шин. Проверка связей (ERC) и верификация иерархии помогают избежать ошибок при создании проекта. Имеется возможность импортировать и экспортировать данные из многих электронных САПР - *PCAD, OrCAD, PADS и других*;
- *DipTrace PCB Layout* - редактор печатных плат с удобной ручной и автоматической трассировкой и позиционированием компонентов. Встроенный современный бессеточный

автотрассировщик способен качественно и быстро разводить как сложные многослойные платы с разными типами ЭРЭ, так и простые двухслойные платы. Программа позволяет импортировать файлы проекта, списки соединений, производственные файлы и библиотеки из P-CAD, PADS и других популярных программ. Экспорт в P-CAD, Gerber и другие форматы позволяет подготовить платы для любого производства.

- *ComEdit* - редактор корпусов;
- *SchemEdit* - редактор компонентов.

Функция трёхмерного просмотра моделирует внешний вид печатных узлов позволяет выявить недостатки компоновки ещё до передачи в производство. Большая коллекция компонентов (в том числе более 2.5 тыс. 3D-моделей корпусов) предоставляет пользователям практически весь список современных электронных элементов разных фирм.

Цены на DipTrace довольно умеренные по сравнению с другими САПР печатных плат.

На сайте <http://www.diptrace.com/rus/> можно скачать бесплатную ограниченную русскую Freeware-версию DipTrace (300 выводов и 2 слоя).

Недостатки:

- отсутствие компонентов, соответствующих требованиям ГОСТ;
- отсутствие возможности представления списка компонентов в виде дерева, с строгой типизацией по функциональному назначению;
- отсутствие печати в редакторах корпусов и компонентов;
- отсутствие возможности произвольного выбора наименования списка компонентов (по типам, номиналам, корпусам и т.п.).

3.5 САПР моделирования режимов РЭС

Применение численного моделирования режимов РЭС позволяет значительно ускорить разработку и сократить количество дорогостоящих испытаний опытных образцов и макетов изделий.

3.5.1 «АСОНИКА» - автоматизированная система обеспечения надёжности и качества РЭС.



Отечественная система обеспечения надёжности и качества аппаратуры АСОНИКА [54] применяется для анализа и обеспечения стойкости РЭС к комплексным тепловым, механическим, электромагнитным воздействиям и автоматизации документооборота. АСОНИКА выполняет автоматизированное проектирование РЭС подвижных объектов в соответствии с требованиями CALS-технологий и позволяет ещё до изготовления заменить испытания РЭС комплексном компьютерным моделированием на внешние механические, тепловые, электромагнитные и другие воздействия. Решаются следующие основные проблемы проектирования современных РЭС:

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

- обеспечение безопасности людей на подвижных объектах (авиационном, космическом, железнодорожном, автомобильном и других видах транспорта 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 РЭС 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.

Для моделирования механических и тепловых характеристик произвольных объёмных конструкций РЭС, в том числе интегральных микросхем, при воздействии гармонических и случайных вибраций, одиночных и многократных ударов, линейных ускорений, при стационарных и нестационарных тепловых воздействиях используется подсистема АСОНИКА-М-3D [82], позволяющая обосновать необходимость дополнительной защиты РЭС от механических воздействий. В результате моделирования могут быть получены поля перемещений, ускорений (Рис. 3.17), напряжений, а также графики зависимости суммарных ускорений и перемещений от времени или частоты.

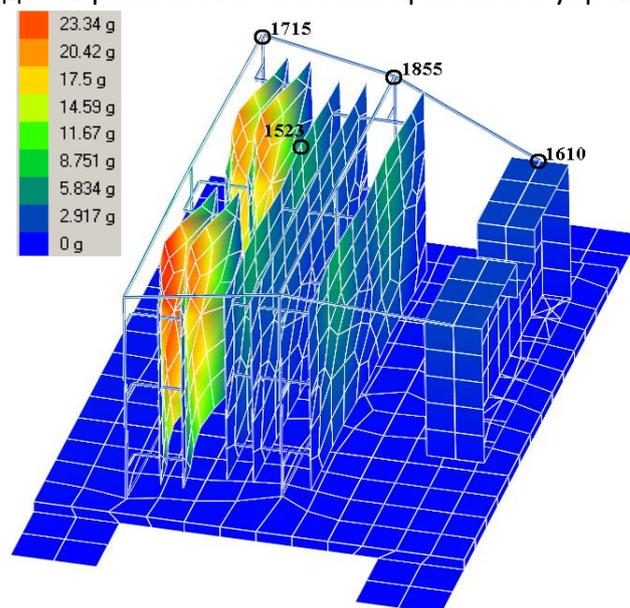


Рис. 3.17 - Поле ускорений блока РЭС на резонансной частоте колебаний

Для моделирования тепловых режимов верхних конструктивных уровней (стойки, блоки, объект) используется подсистема «АСОНИКА-Т», а для моделирования печатных узлов – подсистема «АСОНИКА-ТМ».

Подсистема АСОНИКА-Т предназначена для компьютерного моделирования стационарных и нестационарных тепловых процессов, протекающих в конструкциях РЭС различных уровней иерархии от шкафов до блоков.

Подсистема АСОНИКА-ТМ позволяет выполнять комплексный анализ конструкций печатных плат и узлов РЭС с возможностью использования как конечно-разностных, так и конечно-элементных моделей:

- стационарных и нестационарных тепловых режимов как при нормальном, так и при пониженном давлении (Рис. 3.18);

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

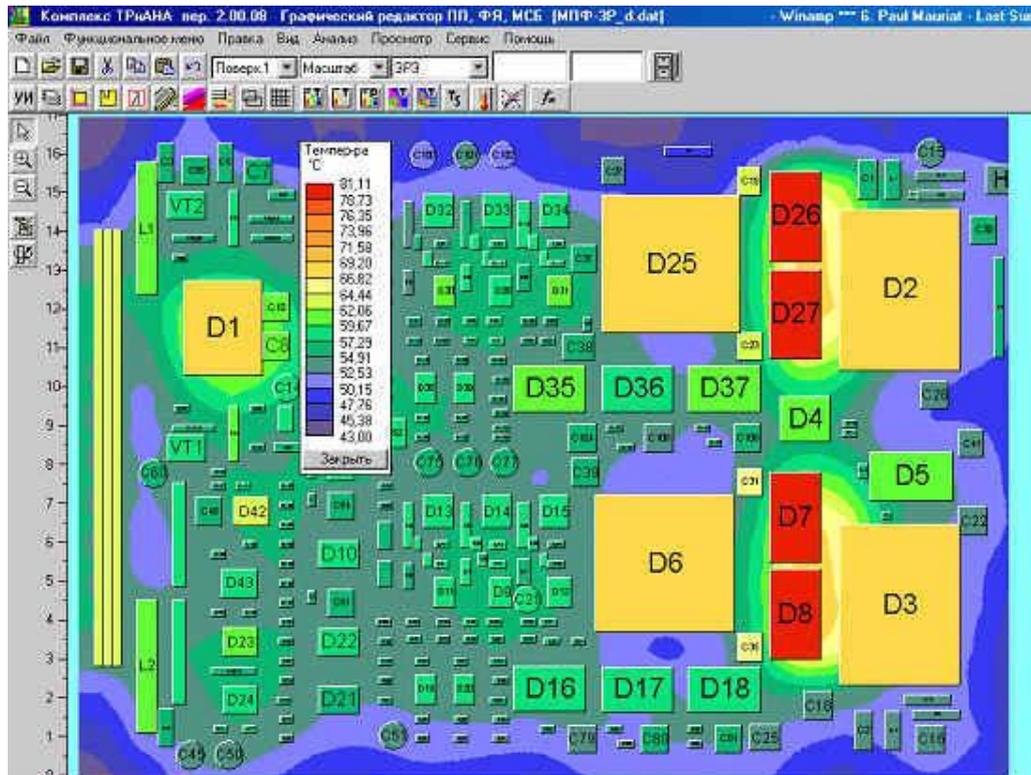


Рис. 3.18 – Моделирование стационарных и нестационарных тепловых процессов в РЭС с помощью программного комплекса *TRuANA (АСОНИКА-ТМ)*

База данных *АСОНИКА-ТМ* содержит справочные геометрические, теплофизические, физико-механические и усталостные параметры ЭРЭ и конструкционных материалов, что существенно облегчает и ускоряет моделирование.

Конверторы с популярными САПР проектирования печатных плат *PCAD, Mentor Graphics, Altium Designer, OrCAD* и др. автоматически считывают координаты расположения всех ЭРЭ на плате и геометрию самого печатного узла.

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.

В настоящее время автоматизированная система *АСОНИКА* состоит из 13 подсистем, которые позволяют моделировать электрические, тепловые, аэродинамические, механические и деградационные процессы в аппаратуре, осуществляют диагностическое моделирование, анализ показателей надёжности.

3.5.2 «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 [83,84].

Увеличение плотности компоновки ЭРЭ создаёт предпосылки для перегрева электронных компонентов (Рис. 3.19), 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 производстве. 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.

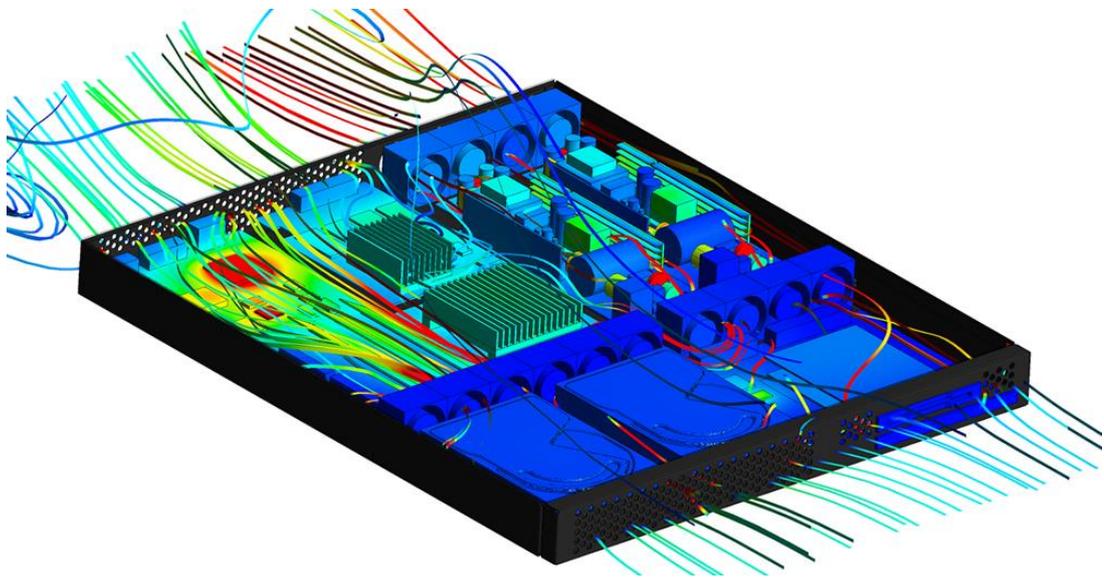


Рис. 3.19 - Моделирование воздушных и тепловых потоков в блоке РЭС с помощью ANSYS

В состав программного комплекса ANSYS входят подсистемы:

- Multiphysics – позволяет проводить расчёты в области прочности, распространения тепла, механики жидкостей и газов, электромагнетизма, а также решать связанные задачи;
- Mechanical (подмножество Multiphysics) – для выполнения проектных разработок, анализа и оптимизации: решение сложных задач прочности конструкций, теплопередачи и акустики. Даёт возможность находить перемещения, напряжения, усилия, температуры, давления и другие параметры, важные для оценки механического поведения материалов и прочности конструкции;

- Structural (подмножество Mechanical) – выполняет точный анализ сложных конструкций с учётом всевозможных нелинейностей, среди которых геометрическая и физическая нелинейности, нелинейное поведение конечных элементов и потеря устойчивости;

- LS-DYNA – для решения прочностных задач динамики при больших нелинейностях. Может также использоваться для численного моделирования процессов формообразования материалов, анализа аварийных столкновений и ударов при конечных деформациях, включая пробивание, нелинейное поведение материала и контактное взаимодействие элементов конструкции;

- ED – обладает возможностями Multiphysics, но имеет ограничения по размерам расчётной модели (для учебных целей).

ANSYS позволяет создавать непосредственно сетку конечных элементов (то есть узлы и элементы), а также геометрическую модель, на основе которой далее создаётся сетка конечных элементов.

Этап приложения нагрузок и получение решения включает в себя задание вида анализа и его опций, нагрузок, шага решения и заканчивается запуском на счёт конечно-элементной задачи.

С помощью ANSYS можно:

- рассчитывать интегральные схемы и упаковки интегральных схем, печатные платы, соединители и линии передач, антенны и элементы трактов, аналоговую и цифровую электронику, датчики, трансформаторы, электроприводы и многое другое;

- проводить быстрое и точное моделирование антенн различного типа;

- проверять электромагнитную совместимость в условиях действия большого количества приёмо-передающих устройств и анализировать эффективность мер, принятых для улучшения ЭМС:

- моделировать сложные силовые схемы управления, схемы контроля и измерения параметров электромеханических систем;

- определять температурные и термонапряжённые состояния, моделировать стационарные и нестационарные задачи теплообмена, задачи охлаждения, деформации материалов из-за нагрева, влияние термоциклирования на прочностные характеристики;

- проводить анализ теплового состояния микрочипов, ПП и электронных устройств, определять теплопроводность печатных плат, выбирать системы охлаждения, рассчитывать термонапряжённые состояния печатных плат и электронных блоков;

- проводить статические и динамические расчёты деталей под нагрузкой с учётом нелинейного отклика материалов, определять напряжённо-деформированные состояния конструкций, вызванные нагревом или охлаждением;

- проводить анализ тепловых деформаций и напряжений, вызванных потерями мощности на нагрев, охлаждение электроники, шумы и вибрации в электрических машинах и трансформаторах, моделирование работы пьезоизлучателей и др.

3.5.3 «Microwave Office» - система проектирования высокочастотных и сверхвысокочастотных РЭС



Для проектирования 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, широко используют известный универсальный пакет *Microwave Office* (Микроволновый офис), разработанный компанией *AWR (Applied Wave Research) Corporation* [85] (Рис. 3.20).

В *Microwave Office* вместе в едином представлении совмещены три уровня проектирования: системные параметры каналов распространения сигналов, схемотехника и конструкция. Используемые в *Microwave Office* методы расчёта схем опираются на фундаментальные знания теории электромагнитного поля, теории радиоэлектронных цепей, на разделы устойчивости усилителей и генераторов, а также других устройств.

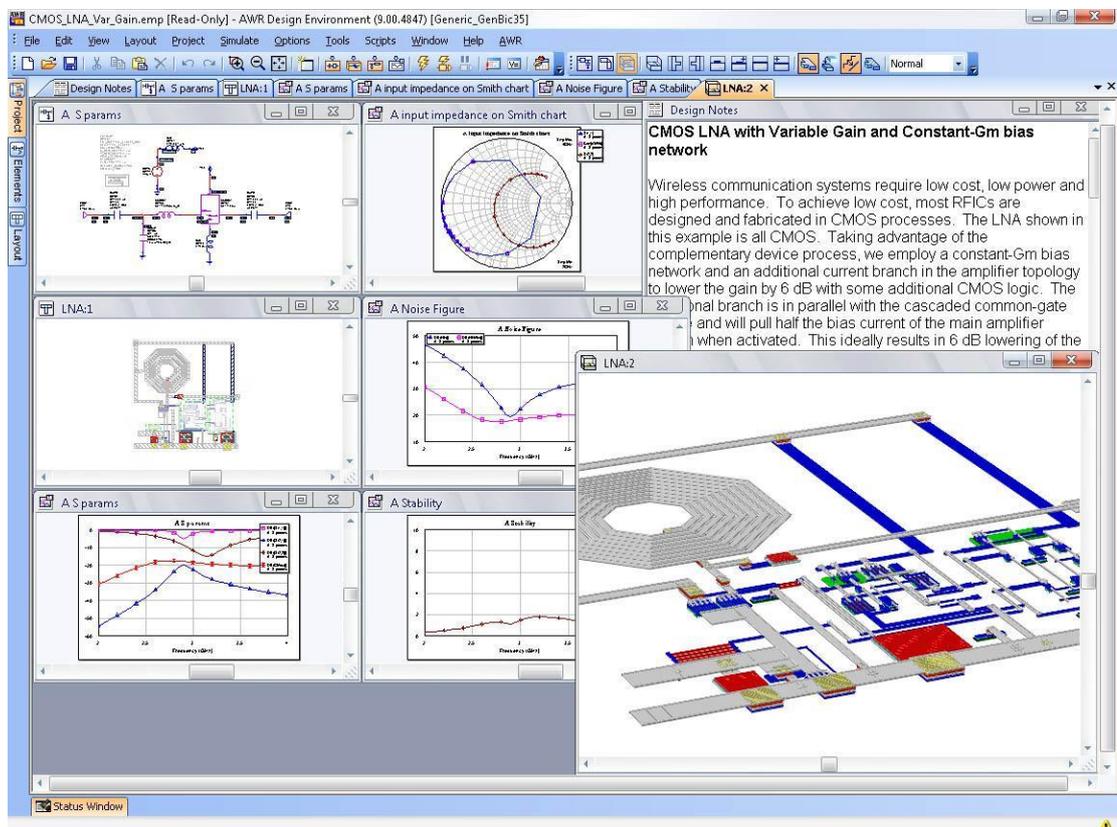


Рис. 3.20 - Моделирование СВЧ-устройств с помощью *Microwave Office*

4 Список литературы

1. // Information71576766: [сайт]. URL: <https://sites.google.com/site/information71576766/home/opredelenie-informacionnyh-tehnologij>
2. 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.
3. Варламов, Р.Г. и др.. Справочник конструктора РЭА: Общие принципы конструирования. — М.: Сов. радио, 1980. — 480 с.
4. Гелль П.П., Иванов-Осипович Н.К. Конструирование и микроминиатюризация РЭА. - Л.: Энергоатомиздат, 1984. - 536 с.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Ненашев А.П.. Конструирование радиоэлектронных средств.. - М.: Высш. шк. , 1990. - 432 с.
10. Фрумкин Г.Д. Расчет и конструирование радиоэлектронной аппаратуры.. — М.: Высш. шк., 1985. — 287 с.
11. Дульнев Г.Н., Семяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. - М.: Энергия, 1968. - 359 с.
12. 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.
13. 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.

14. 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.
15. Малюх В.Н. Введение в современные САПР: Курс лекций. - М.: ДМК Пресс, 2010. - 192 с.
16. ГОСТ Р 52003-2003. Уровни разукрупнения радиоэлектронных средств. Термины и определения. - М.: Стандартиформ, 2003. - 7 с.
17. ГОСТ 2.001—2013. Единая система конструкторской документации. Общие положения. - М.: Стандартиформ, 2014. - 6 с.
18. 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>
19. ГОСТ 3.1001-81. Единая система технологической документации. Общие положения. - М.: Стандартиформ, 1983. - 6 с.
20. ГОСТ 19.001-77. Единая система программной документации. Общие положения. - М.: Стандартиформ, 2010. - 6 с.
21. ГОСТ 3.1001-81. Единая система технологической документации. Общие положения. - М.: Госстандарт СССР, 2003. - 8 с.
22. 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.
23. 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.
24. ГОСТ 2.102-2013. ЕСКД. Виды и комплектность конструкторских документов. - М.: Стандартиформ, 2014. - 14 с.
25. ГОСТ 2.051-2013. ЕСКД. Электронные документы. Общие положения. - М.: Стандартиформ, 2014. - 12 с.
26. 2.052-2006 Г. Электронная модель изделия. Общие положения. - М.: Стандартиформ, 2006. - 11 с.
27. Габасов Р., Кириллова Ф.М., Альсевич В.В. и др. Методы оптимизации. - Минск: Четыре четверти, 2011. - 472 с.
28. Амелина М.А., Амелин С.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10.. - Смоленск: Смоленский филиал НИУ МЭИ, 2012. - 617 с.
29. Каганов В.И. Радиотехника + компьютер + Mathcad. - М.: Горячая линия - Телеком, 2001.- 416 с.
30. Фриск В.В. Основы теории цепей. Расчеты и моделирование с помощью пакета компьютерной математики Mathcad. - М.: СОЛОН-Пресс, 2006. - 88 с.

31. Макаров Е. Инженерные расчеты в Mathcad 15: Учебный курс. - СПб.: Питер, 2011. - 400 с.
32. П.И. Овсищер, И.И. Лившиц, А. К. Орчннский и др. Компонировка и конструкции микроэлектронной аппаратуры: Справочное пособие; Под ред. Б.Ф. Высоцкого, В.Б. Пестрякова, О.А. Пятлина. - М.: Радио и связь, 1982. - 208 с.
33. Туманов А.В. Основы компоновки бортового оборудования космических аппаратов : Учеб. пособие / А.В. Туманов, В.В. Зеленцов, Г.А. Щеглов.. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. - 344 с.
34. Уваров А.С. P-CAD. Проектирование и конструирование электронных устройств. - М.: Горячая линия - Телеком, 2004. - 760 с.
35. Стешенко В.Б. P-CAD. Технология проектирования печатных плат. — СПб: БХВ-Петербург, 2003. - 720 с.
36. Саврушев Э.Ц. P-CAD 2006. Руководство схемотехника, администратора библиотек, конструктора. — М.: ООО «Бином-Пресс», 2007 — 768 с.
37. Уваров А.С. Программа P-CAD. Электронное моделирование. - М.: Диалог-МИФИ, 2008. - 192 с.
38. Лопаткин А.В. P-CAD 2004. - СПб : БХВ-Петербург, 2006. - 560 с.
39. 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.
40. Сабунин А.Е. Altium Designer. Новые решения в проектировании электронных устройств. - М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2009. - 432 с.
41. 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.
42. 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.
43. // PCB SOFT. Партнер и официальный дистрибьютор фирмы CADENCE Design Systems : [сайт]. [2016]. URL: <http://www.pcbsoft.ru/>
44. Прохоренко В.П. SolidWorks. Практическое руководство. — М.: ООО «Бином-Пресс», 2004. — 448 с.
45. // SolidWorks Russia: [сайт]. [2014]. URL: http://www.solidworks.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=174&Itemid=9
46. Большаков В.П., Бочков А.Л., Сергеев А.А. 3D-моделирование в AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, Inventor, T-Flex. - СПб: Питер, 2011. - 336 с.
47. Сорокин В., Алямовский А., "Проектирование радиоэлектронной аппаратуры в среде SolidWorks," *САПР и графика*, август 2010. pp. 67-74.

48. Алямовский. COSMOSWorks. Основы расчёта конструкций на прочность в среде SolidWorks. - М.: ДМК Пресс, 2010. - 784 с.
49. Каленкович Н.И. и др. Механические воздействия и защита радиоэлектронных средств: Учеб. пособие для вузов. - Минск: Выш. шк., 1989. —244 с.
50. Кольтюков Н.А. Проектирование несущих конструкций радиоэлектронных средств : Учебное пособие / Н.А. Кольтюков. О.А. Белоусов. -Тамбов: изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. - 84 с.
51. Уразаев В.Г. Влагозащита печатных узлов. - М.: Техносфера, 2006. - 344с.
52. Е.Н. Маквецов, А.М. Тартаковский. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов. - М.: : Радио и связь, 1993. - 200 с.
53. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре: Учебник для вузов по спец. «Конструир. и произв. радиоаппаратуры». — М.: Высш. шк., 1984. — 247 с.
54. 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.
55. Роткоп Л.Л., Спокойный Ю.Е.. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. - М.: Советское радио, 1976 - 232 с.
56. Бородин С.М. Обеспечение тепловых режимов в конструкциях радиоэлектронных средств : Методические указания к лабораторным работам по дисциплине "Проектирование РЭС". – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 52 с.
57. Малков Н.А. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств : учеб, пособие / А.П. Пудовкин. - Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. - 88 с.
58. Бузов А.Л., Быховский М.А., Васехо Н.В., Волкова Ю.В. и др. Управление радиочастотным спектром и электромагнитная совместимость радиосистем. Учебн. пособие / Под ред. д.т.н., проф. М.А. Быховского.. - М.: Эко-Трендз, 2006. — 376 с.
59. МОСКВА, АРМС-ТАСС. Комплекс радиолокационной разведки для ВВС Казахстана [Электронный ресурс] // Новости ВПК: [сайт]. [2013]. URL: http://vpk.name/news/84749_kompleks_radiolokacionnoi_razvedki_dlya_vvs_kazahstana.html
60. ГОСТ Р 51676-2000. Конструкции несущие базовые радиоэлектронных устройств. Термины и определения. -М.: Госстандарт России, 2000. - 10 с.
61. ГОСТ Р 51623-2000 Конструкции базовые несущие радиоэлектронных средств. Система построения и координационные размеры. - М.: Госстандарт России, 2000. - 12 с.
62. ГОСТ 2.103-2013. Стадии разработки. - М.: Стандартиформ, 2015. - 6 с.
63. ГОСТ Р 15.201-2000. Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. - М.: Стандартиформ, 2003. - 13 с.

64. ГОСТ Р 15.201-2000. Система разработки и постановки продукции на производство. Порядок разработки и постановки продукции на производство. - М.: Госстандарт России, 2000. - 9 с.
65. ГОСТ Р 15.011-96 Система разработки и постановки продукции на производство. Патентные исследования. Содержание и порядок проведения. - М.: Госстандарт России, 2006. - 16 с.
66. ГОСТ 2.118-2013. ЕСКД. Техническое предложение. - М.: Стандартиформ, 2015. - 9 с.
67. ГОСТ 2.119-2013. ЕСКД. Эскизный проект. - М.: Стандартиформ, 2015. - 6 с.
68. ГОСТ 2.120-2013. ЕСКД.. Технический проект. - М.: Стандартиформ, 2015. - 6 с.
69. С.А. Каплун, Т.Ф. Худякова, И.В. Щекин. SolidWorks. Оформление чертежей по ЕСКД,: Учебное пособие. - М.: SolidWorks Russia, 2009. - 190 с.
70. 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.
71. Концевич В.Г. Твердотельное моделирование в Autodesk Inventor.. - М.: ДиаСофт, 2008. - 672 с.
72. КОМПАС-3D V14. Больше чем CAD // Компания "Аскон". URL: <http://ascon.ru/>
73. Басов К.А. CATIA V5. Геометрическое моделирование. - М.: ДМК Пресс , 2008. - 269 с.
74. Catia V5 // Обзор Систем Автоматизированного Проектирования (САПР). URL: http://rucadcam.ru/publ/catia/catia_v5/6-1-0-13
75. Лузин С., Полубасов О., "Топологическая трассировка - реальность или миф?," *EDA EXPERT*, Май 2002. pp. 42 - 46.
76. Сергеев А., "OrCAD PCB Designer Standard - лучший редактор печатных плат для профессионалов," *Современная электроника*, Aug 2014. pp. 1-4.
77. 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.
78. Уваров А.С. Проектирование печатных плат. 8 лучших программ. - М.: ДМК Пресс, 2009. - 288 с.
79. С.Лузин, Г.Петросян, О.Полубасов, "ТороR – современная САПР печатных плат," *Печатный монтаж*, No. 1 , 2009. pp. 10-13.
80. // DipTrace - САПР по разработке схем и электронных печатных плат: [сайт]. [2016]. URL: <http://diptrace.com/rus/diptrace-software/>
81. Novarm Ltd. DipTrace. Руководство пользователя. 2013. - 240 с.

82. ООО НИИ "АСОНИКА". АСОНИКА-М-3D [Электронный ресурс] // АСОНИКА. Автоматизированная система обеспечения надёжности и качества аппаратуры: [сайт]. [2016]. URL: <http://asonika-online.ru/products/asonika-m-3d/>
83. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров: Справ, пособие. - М. : Машиностроение-1, 2004. - 512 с.
84. 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>
85. 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.