

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Полоцкий государственный университет»

О. Е. Шестопалова
Т. Н. Дровосекова

**Интегрированные САПР
производства радиоэлектронных средств**

Конспект лекций
для магистрантов специальности
1-40 80 04 «Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ»

Новополоцк
ПГУ
2010

621.38
Ш 52



12140111758861Б УО "ПГУ"

УДК 681.3.001(075.8)
ББК 32.844я73
Ш52

- 208 958 -

Рекомендовано к изданию методической комиссией
факультета информационных технологий
в качестве учебно-методического комплекса
(протокол № 3 от 25.03.2009)

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

ведущий инженер-программист Новополоцкого ГУЭС
В. П. ЕРМАШКЕВИЧ;
канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой конструирования и технологий РЭС
Ю. Г. ГРОЗБЕРГ

Ш52 Шестопалова, О. Е.
Интегрированные САПР производства радиоэлектронных средств:
конспект лекций для магистрантов специальности 1-40 80 04 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» /
О. Е. Шестопалова, Т. Н. Дровосекова. – Новополоцк : ПГУ, 2010. – 100 с.
ISBN 978-985-531-019-9.

Рассматриваются актуальные вопросы методологии создания интегрированных САПР производства РЭС на двух различных уровнях: базовом – интеграция функционального, конструкторского и технологического проектирования, и верхнем – интеграция на уровне поддержки полного жизненного цикла РЭС. Приводятся альтернативные варианты решения задач интеграции, в т.ч. новые подходы, существующие на уровне гипотез или начальной отработки, а также определяется круг существующих на сегодняшний день проблемных вопросов интеграции. Рассматриваются вопросы стандартизации и унификации создания интегрированных САПР производства РЭС. Приводится перечень последних публикаций в научной периодике по тематике дисциплины, рекомендуемый к использованию при выполнении магистрантами практической зачетной работы.

Предназначен для магистрантов специальности 1-40 80 04 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Может быть полезен студентам факультета информационных технологий и радиотехнического факультета в качестве дополнительного методического материала при прохождении цикла дисциплин, связанных с автоматизацией проектирования.

УДК 681.3.001(075.8)
ББК 32.844я73

ISBN 978-985-531-019-9

© Шестопалова О. Е., Дровосекова Т. Н., 2010
© УО «Полоцкий государственный университет», 2010

Ціагасхор...

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение в курс «Интегрированные САПР производства РЭС»	4
2. Базовая интеграция проектирования	5
2.1. Автоматизация сквозного проектирования РЭС	5
2.2. Развитие системных решений в области базовой интеграции проектирования РЭС	7
3. Перспективная методология САПР базового уровня интеграции	11
3.1. Трехмерное проектирование в интегрированных САПР РЭС	11
3.1.1. Характеристика уровня развития и перспектив 3D-проектирования	11
3.1.2. Интеграция «электронных» и «механических» САД-сред в области 3D-моделирования	13
3.1.3. Анализ тепловых и электромагнитных процессов с использованием 3D-моделирования	23
3.2. Быстрое прототипирование	31
3.2.1. Традиционные субтрактивные технологии твердотельного прототипирования	32
3.2.2. Аддитивный алгоритм и стандартизация быстрого прототипирования	35
3.2.3. Технологии быстрого прототипирования	39
3.3. Топологические методы автоматической трассировки	51
3.3.1. Сеточные алгоритмы автотрассировки печатных плат	51
3.3.2. Бессеточная и топологическая автотрассировка печатных плат	54
4. Системная интеграция на уровне поддержки жизненного цикла РЭС	65
4.1. Полный жизненный цикл продукта и информационная интеграция его поддержки в рамках CALS-концепции	65
4.2. Технологии поддержки жизненного цикла продукта	72
4.3. Особенности стандартизации и технологические решения поддержки жизненного цикла РЭС	77
Литература	89

1. ВВЕДЕНИЕ В КУРС «ИНТЕГРИРОВАННЫЕ САПР ПРОИЗВОДСТВА РЭС»

Как следует из названия курса, его объектом являются радиоэлектронные системы (РЭС), что связано с профильной направленностью магистерской специальности 1-40 80 04 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Для конкретизации предмета курса необходимо определить природу возможных взаимодействий выпускника по специальности с САПР в рамках будущей профессиональной деятельности.

Выпускники магистерской специальности 1-40 80 04 по отношению к САПР могут позиционироваться как:

- пользователи САПР РЭС;
- разработчики САПР (не обязательно с объектной привязкой).

Рассмотрим подробнее связь предмета курса с этими двумя альтернативными направлениями профессиональной деятельности.

Пользователь САПР РЭС. *Базовая квалификация* в данной сфере должна быть обеспечена курсами по автоматизации проектирования предшествующего высшего образования. В силу различия специальностей базовая квалификация формируется с акцентом на конкретный аспект (функциональный, конструкторский, технологический), и, соответственно, автоматизацию определенных этапов в полном цикле проектирования РЭС. В силу специфики высшего инженерного образования базовая квалификация имеет прикладную направленность. *Магистерский курс «Интегрированные САПР производства РЭС»* должен обеспечить расширение базовой квалификации по следующим направлениям:

- формирование целостного представления о сквозном проектировании РЭС и методологии объединения нескольких профессиональных САПР в интегрированную САПР РЭС;
- изучение стратегии и методологии интеграции всех подсистем поддержки жизненного цикла РЭС.

Разработчик САПР. *Базовая квалификация* квалификации в данной сфере должна быть обеспечена курсами, в которых рассматривалась формализация методов проектирования и математические модели САПР, а также разработка прикладных программ для локальных задач САПР. Все эти курсы были профильными, т. е. имели привязку к определенным подклассам общего объекта проектирования – РЭС.

Магистратура по специальности в целом должна обеспечить расширение базовой квалификации в области освоения универсальных мето-

дов математического моделирования, численных методов и реализации комплексных программных проектов. *Магистерский курс «Интегрированные САПР производства РЭС»* должен обеспечить расширение базовой квалификации по следующим направлениям:

- проблемный анализ современной перспективной методологии САПР, ее прикладных возможностей и направлений развития;
- интеграция на уровне информационной совместимости; обеспечения целостности данных при импорте/экспорте между подсистемами (авторскими или сторонних разработчиков) интегрированной САПР.

Помимо освоения теоретической части, магистерский курс предполагает выполнение зачетной работы, состоящей в подготовке и презентации реферата по двум разделам:

- теоретическому, раскрывающему подробно аспекты использования моделей, методов и алгоритмов интегрированных САПР производства РЭС (тематика вопросов на выбор по данному разделу работы выдается преподавателем на первой лекции по курсу);
- практическому, связанному с тематикой диссертационной работы магистранта и с содержанием курса (задание по практической части работы выдается преподавателем после ознакомления с тематикой диссертационных работ магистрантов).

Рекомендуемый объем работы – не более 30 страниц (12 шрифт, одинарный интервал). Работа представляется на кафедру до календарного начала сессии в твердой копии и электронном виде.

2. БАЗОВАЯ ИНТЕГРАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Структура полной интеграции систем автоматизированного проектирования производства РЭС является двухуровневой:

- базовый уровень – интеграция проектирования;
- верхний уровень – интеграция задач и подсистем поддержки всего жизненного цикла РЭС.

Рассмотрим современные средства автоматизации сквозного проектирования РЭС и развитие системных решений базового уровня интеграции.

2.1. Автоматизация сквозного проектирования РЭС

Под *проектированием технического объекта* понимают процесс преобразования его исходных описаний в достаточные или окончательные, т.е. такие описания, которые позволят изготовить или реализовать объект в

заданных условиях. Исходным описанием является техническое задание, отражающее назначение и основные требования к проектируемому объекту. Начальные описания технического задания в процессе проектирования поэтапно последовательно детализируются по трем аспектам проектирования: функциональному, конструкторскому и технологическому.

Функциональный аспект отражает физические и информационные процессы, протекающие в объекте при его функционировании. *Конструкторский аспект* характеризует структуру, расположение в пространстве и форму составных частей объекта. *Технологический аспект* характеризует технологичность, возможности и способы изготовления объекта в заданных условиях. Несмотря на четкое разграничение аспектов жесткие взаимосвязи между ними обеспечивают целостность представлению объекта.

Последовательная детализация описаний реализуется в рамках системного подхода, который требует иерархической организации многоаспектного проектирования. Так, при реализации функциональных решений на уровне функциональной схемы в конструкторском аспекте решается задача компоновки конструктивно обособленных блоков (корпусных решений), а в технологическом аспекте осуществляется принципиальный выбор технологии. При реализации функциональных решений на схемотехническом уровне, т.е. в виде принципиальной схемы в конструкторском аспекте решается задача топологического проектирования, а в технологическом аспекте разрабатывается технологический маршрут.

С точки зрения процесса проектирования интеграция проявляется в неразрывном триумвирате аспектов и наследовании результатов при переходе к каждому следующему уровню проектирования. Рассмотрим инструментарий автоматизации, используемый в рамках базовой интеграции проектирования, – средства автоматизации сквозного проектирования РЭС, так называемые EDA-системы (Electronic Design Automation).

Сквозная САПР РЭС (EDA) включает [1 – 4, 16]:

1) системы автоматизации функционального проектирования и конструирования:

- системы автоматизированного проектирования топологий – «электронные» САД-среды (Computer Aided Design);
- системы автоматизированного конструирования – «механические» САД-среды;
- системы функционального проектирования (САПР интегральных схем и симуляторы схем) – САЕ-среды (Computer Aided Engineering), такие как САПР ПЛИС, Spice-подобные САПР схемотехнического моделирования цифровой, аналоговой и смешанной аппаратуры, САПР ВЧ и СВЧ аппаратуры;

2) автоматизированные системы технологической подготовки производства – САМ-среды (Computer Automation Manufacturing).

Структура сквозной автоматизации проектирования РЭС базового уровня интеграции с примерами программных продуктов каждого класса разных производителей ПО представлена на рис. 1.

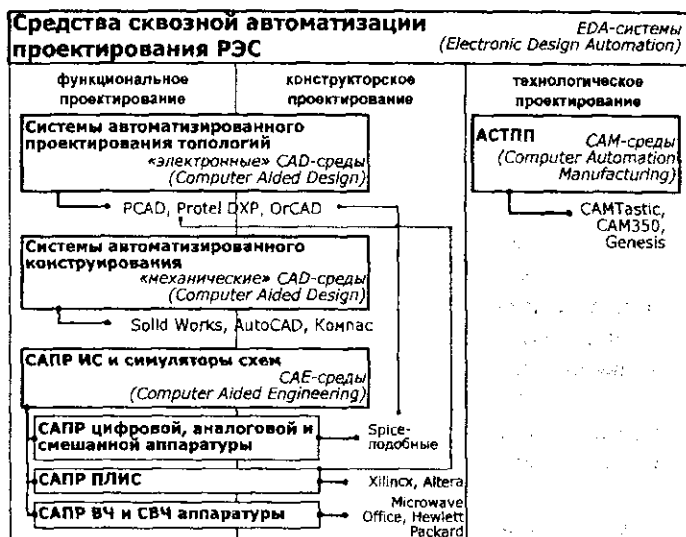


Рис. 1

Таким образом, сквозная базовая интеграция проектирования обеспечивается САД/САЕ/САМ системами (применительно к РЭС, определяемым как EDA-системы).

2.2. Развитие системных решений в области базовой интеграции проектирования РЭС

Большинство производителей ПО САПР РЭС предлагают системные решения в области базовой интеграции проектирования по целому ряду направлений [2, 3, 5 – 9, 11, 12]. Рассмотрим отдельные направления на примерах конкретных интеграционных решений.

Универсализация САЕ-сред. Решение в этом направлении предлагает фирма Electronics Workbench, ранее выпускавшая одноименный симуля-

тор цифровых и аналоговых схем. В 2001 г. фирма предложила существенно модифицированный программный продукт под новым названием Multisim, в котором дополнительно обеспечена возможность описания цифровых устройств на языке VHDL, их моделирования и синтеза ПЛИС, и добавлены модули проектирования ПП.

Компанией Applied Wave Research (разработчик пакета Microwave Office) осуществлена интеграция MWO со средствами моделирования аналого-цифровых устройств обработки сигналов на функциональном уровне (новая программа получила название Visual Systems Studio – VSS).

Компания Altium в 2004 г. представила новый пакет CircuitStudio, который по сравнению с базовым пакетом схемотехнического моделирования CircuitMaker «усилен» предтопологическим анализом целостности сигналов и VHDL-моделированием.

Интеграция отдельных «электронных» CAD, CAE и CAM-сред в мультисистемы сквозного проектирования. Примером решения интеграции в этом направлении является новая стратегия компании Altium, реализуемой на базе идеологии сквозного проектирования, согласно которой компания намерена интегрировать все свое ПО (P-CAD, Protel, Nexar, CircuitMaker и проч.) с помощью управляющей оболочки Design eXplorer, впервые использованной в САПР Protel. В 2002г. осуществлена интеграция P-CAD и Protel, а версия P-CAD-2004 уже объединяет ПО всего сквозного цикла. Новый уровень интеграции дополнительно обеспечивается:

- двунаправленной синхронизацией схем и печатных плат: улучшена многокритериальная верификация цепей на топологии и схеме;
- комплексным описанием всех компонентов проекта, включающее не только информацию о символах, геометрических размерах и топологии посадочных мест компонентов, но и параметры их SPICE-моделей.

К 2006 г. интеграция завершилась объединением всей линейки ПО, в т.ч. и пакетов ПЛИС-проектирования: Nexar и пакета разработки встраиваемого ПО Tasking. Комплексный пакет проектирования Altium Designer с использованием управляющей оболочки Design Explorer реализует всю иерархию построения проекта. Преимущество заключается в удобстве единственного приложения, имеющего одновременный доступ к проектам схем, текстовым описаниям на уровне VHDL и Verilog, проектам печатных плат и программируемой логики, интегрированным библиотекам и т.д. Благодаря удобству администрирования системы пользователи имеют возможность групповой разработки и контроля проектов. Altium Designer v 6.0 в составе САПР Protel, Nexar, CircuitStudio, Tasking и CAMtastic на международной конференции DesignCon 2007 был признан лучшим в номинации «Ком-

плексный пакет разработки электронных систем» и получил награду как лучший инновационный продукт от Международного инженерного консорциума (IEC). Достоинства этого комплексного решения настолько очевидны, что компания Altium объявила о том, что система P-CAD больше не будет развиваться и остановится на существующей версии P-CAD 2006.

Компания Cadence выпустила в 2003 г. очередную версию OrCAD 10, в которой реализована последовательно развиваемая компанией стратегия модульной интеграции под общим названием OrCAD Unison. Предлагаемое решение является комплексным универсальным инструментом, позволяющим осуществить полный сквозной цикл проектирования РЭА от ввода проекта до изготовления управляющих файлов для технологического оборудования. Новый уровень интеграции обеспечивается, который обеспечивается в т.ч. и внесением синхронных изменений в схемотехническую и топологическую части проекта, теперь имеет возможность более гибких настроек. При использовании этого инструментария предусмотрен предварительный просмотр результатов внесения изменений с возможностью их принятия или отказа от них.

Информационная совместимость «электронных» CAD/CAE/CAM-сред различных производителей. Примером такого решения может служить пакет схемотехнического проектирования CircuitStudio от Altium, позволяющий генерировать списки соединений в форматах практически всех современных систем проектирования топологий: Protel 2004 (что наиболее оптимально за счет полной интеграции между этими пакетами в рамках комплексного пакета проектирования Altium Designer v 6.0), так и в любой другой системе, например: OrCAD, PCB Design Studio и т.д.

Все версии P-CAD 200х той же компании Altium оснащены двунаправленным конвертором проектов в систему автотрассировки и расстановки компонентов SPECCTRA от Cadence, несмотря на то, что P-CAD 200х интегрирован со «штатным» трассировщиком Situs пакета Protel. Кроме того, версии P-CAD 200х поддерживают общий с OrCAD и другими САПР электроники управляющих файлов с топологией ПП Gerber RS-274X. Мастера Импорта Altium Designer Importer Wizard обеспечивает корректную трансляцию проектов ПП из P-CAD и OrCAD.

В версиях MWO (разработчик – Applied Wave Research) после 2002 г. для экспорта проектов СВЧ и ВЧ-блоков в CAD-среды для дальнейшей разработки ПП реализована поддержка формата PADS и Gerber RS-274X. Это позволяет экспортировать проекты в P-CAD 200х, Protel и CAMtastic. Кроме того, обеспечена возможность интеграции с ПО 3D электродинамического анализа. Обмен данными осуществляется через специальный ин-

терфейс EM Socket, использующий COM технологию для интеграции с системами Sonnet Suite, Zeland IE3D, Analyst. Но в целом проблема интеграции ПО САПР ВЧ и СВЧ с прочим программным обеспечением EDA, особенно третьих фирм, стоит настолько остро, что ей была посвящена специальная дискуссия на международном симпозиуме 2005 IEEE International Microwave Symposium, в которой приняли участие представители крупнейших производителей EDA программного обеспечения.

Интеграция «электронных» и «механических» САД-сред, в т.ч. для обеспечения возможности 3D-моделирования конструкций РЭС. Сферой ответственности «механических» САД-сред в сквозном проектировании РЭС являются:

- проектирование корпусов, блоков, стоек и т.д.;
- прочностные, тепловые и электромагнитные расчеты;
- подготовка программ для оборудования с ЧПУ;
- проектирование технологических процессов;
- оформление полного комплекта КД на разрабатываемое изделие.

На базовом уровне интеграции – в сквозном проектировании РЭС – информационная совместимость «электронных» и «механических» САД-сред реализуется одним из следующих методов:

1) совместимость реализуется при помощи экспорта/импорта, т.е. одна из систем может читать или записывать входную/выходную информацию в формате другой, сопрягаемой, системы. Примером такой реализации может служить тандем Protel/AutoCAD, в котором Protel как импортирует, так и экспортирует DWG-файлы;

2) используется конвертор, «перегоняющий» информацию из формата первой системы в формат второй. Представителем подобного «посредника» является утилита Protel DXP, формирующая на основе проекта ПП трехмерную модель в пакете SolidWorks;

3) используется промежуточный формат данных, в который преобразуется информация из первой системы, и который воспринимается второй системой. Такими форматами для двумерного моделирования является DXF, используемый для обмена информацией между пакетами векторной графики, DWG или другие. Так, например, программа Microwave Office может импортировать и экспортировать файлы формата DXF; утилита P-CAD WinView обеспечивает передачу данных в AutoCAD и Компас в этом же формате.

Для трехмерного моделирования (3D) промежуточным форматом часто является специальный IDF-формат, предполагающий формирование:

– файла сборки, содержащего информацию о конструктиве ПП (внешнем контуре и внутренних вырезах), позициях установленных компонентов, координатах и размерах сквозных отверстий платы;

– файла библиотеки с данными об очертаниях и высоте корпусов компонентов ПП.

В следующем разделе рассмотрим подробнее уровень развития и перспективы 3D-моделирования в САПР общего назначения, а также интеграцию средств 3D-моделирования с «электронными» CAD/CAE/CAM-средствами.

3. ПЕРСПЕКТИВНАЯ МЕТОДОЛОГИЯ САПР БАЗОВОГО УРОВНЯ ИНТЕГРАЦИИ

К наиболее перспективным и активно развивающимся в последнее время методам автоматизации проектирования РЭС базового уровня интеграции следует отнести:

– методы трехмерного моделирования элементов и конструкций РЭС, а также последующего прототипирования;

– методы топологической трассировки печатного монтажа.

3.1. Трехмерное проектирование в интегрированных САПР РЭС

3.1.1. Характеристика уровня развития и перспектив 3D-проектирования

В последнее время все большую долю рынка «механических» САД-средств завоевывают трехмерные системы твердотельного моделирования, основу которых составляет не чертеж, а объемная компьютерная модель. И если стандартные САПР являются, по сути, результатом формализации и автоматизации ручного проектирования, то системы 3D в корне меняют подход к проектированию. Преимущества 3D-проектирования:

– динамическая визуализация объекта (в т.ч. и анимация), выявление ошибок и проверка на собираемость на стадии проектирования;

– оптимизация конструкции по результатам всестороннего инженерного анализа трехмерных моделей;

– снижение трудоемкости изменений проекта за счет ассоциативности;

– возможность создания фотореалистичных презентаций на стадии проектирования.

Вместе с тем, несмотря на очевидные преимущества, полная замена систем 2D-проектирования на 3D является далекой перспективой. Текущее положение дел отражают результаты опроса проектировщиков, проведенного журналом PC Week (рис. 2).

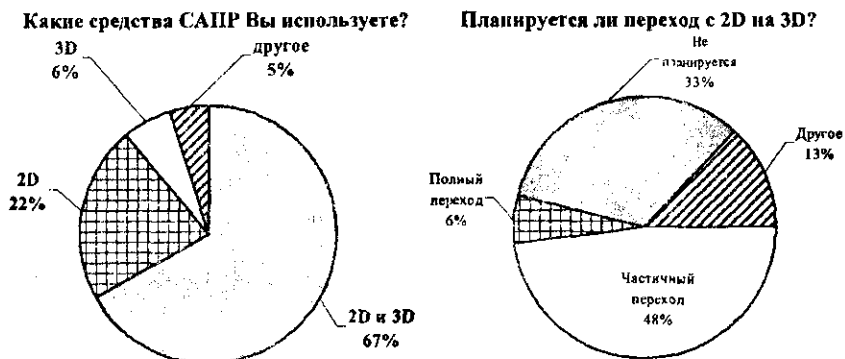


Рис. 2

Аналогичные результаты приводит Aberdeen Group – на западе 85 % инженеров применяют 2D-продукты.

Причины такого положения дел следующие:

- действующие стандарты (ЕСКД, ЕСТД) определяют двумерный чертеж основным типом проектного документа (даже те пользователи, которые работают в трехмерных САПР, вынуждены выпускать чертежи, благо они получаются из 3D-модели автоматически);
- большой объем наработок накоплен на бумажных носителях; необходимость их «оцифровки» обуславливает выбор в пользу 2D-проектирования и соответствующих сред.

Помимо уже рассмотренных выше, пользователи называют следующие причины, затрудняющие переход с 2D на 3D [10]:

- стоимость программного обеспечения (57 %);
- сложность 3D-продуктов (30 %);
- стоимость компьютеров (19 %);
- непонятные преимущества 3D-продуктов (9 %);
- слабая поддержка поставщика (6 %);
- другие причины (8 %).

Немаловажную роль играет и инерция мышления. За двести лет использования чертежей были наработаны определенные методики, накоплены

знания, приобретены навыки, от которых трудно быстро отказаться, сформирована «проекционная» психология, хотя трехмерное моделирование более естественно для человека, поскольку мы живем в трехмерном мире.

Кроме того, 3D-пакеты требуют больше компьютерных ресурсов, чем двумерные. При выборе такого ПК важны многие компоненты, например, мощный процессор и быстрая память, но особое внимание следует обратить на наличие профессиональной видеокарты и 3D-манипулятора. Эти два компонента оказывают наибольшее влияние на производительность работы с 3D-приложениями. Таким образом, внедрение 3D требует не только замены ПО, но и обновления компьютерного парка.

Еще один аспект внедрения 3D связан с организацией управления проектными данными. Ассоциативность трехмерной модели имеет как положительные, так и отрицательные стороны. Как правило, трехмерные САПР создают отдельные файлы для каждой детали и для всей сборки. Пользователям непросто бывает разобраться с версиями этих файлов и со взаимосвязями между ними, особенно когда речь идет о большой сборке, включающей свыше сотни элементов. Помочь им могут системы управления данными, которые обычно содержат специальные функции, избавляющие проектировщиков от ручной работы с файлами.

3.1.2. Интеграция «электронных» и «механических» САД-сред в области 3D-моделирования

Если говорить об автоматизации сквозного проектирования РЭС, то в общем объеме работ существенную долю составляют такие, для которых объективно достаточно 2D-систем: концептуальное проектирование, разработка принципиальных схем, проектирование топологии и проч. Поэтому в данной области перспективна интеграция 2D-проектирования в «электронных» САД-средах с «механическими» 3D-средами для решения задач объемной компоновки, инженерного анализа и презентаций проектируемого устройства.

Самым простым, но, тем не менее, очень полезным является использование полученной трехмерной сборки в операции проверки собираемости. Даже опытным разработчикам бывает трудно представить, где может возникнуть пересечение собираемых электронных модулей, тем более что эти модули проектируют конструкторы печатных плат, а собирает в блок – ведущий конструктор блока. Для проверки собираемости требования к трехмерным моделям ЭРЭ просты – достаточно, чтобы они были разработаны с соблюдением точных геометрических размеров.

В дальнейшем 3D-модель печатной платы можно использовать для различных видов математического моделирования – механического, тепло-

вого, электромагнитного и пр. При этом требования к трехмерным моделям при этом резко возрастают, поскольку теперь они должны содержать информацию, необходимую для работы программ моделирования (тепловые и механические свойства материалов, электрические параметры ЭРЭ и т.д.).

Первые прикладные модули для связи «электронных» и «механических» САД-систем зарубежных производителей программного обеспечения появились на рынке в конце 90-х.

Формирование 3D-модели печатной платы может быть осуществлено двумя методами:

- 1) на базе IDF-файла, передаваемого из «электронной» САД-среды;
- 2) формированием образов в формате 3D-системы на основании проекта печатной платы.

Использование IDF-формата обладает следующими преимуществами:

- универсальность: IDF-формат является стандартом для передачи информации из САПР «электронных» в «механические» и фактически не зависит от того, из какой системы в какую передается проект;

- простота в использовании: система проектирования печатных плат генерирует два файла, которые вкуче дают полное представление о 3D-модели печатной платы. Первый из них описывает сборку печатной платы (габариты подложки, координаты и угол поворота компонентов и т.д.). Второй является библиотечным файлом, в котором описаны используемые компоненты проекта в виде простейших геометрических фигур;

- из предыдущего пункта вытекает следующее: нет необходимости отдельно разрабатывать 3D-модели компонентов в системе 3D-моделирования.

Преимущества построения образа ПП в формате 3D-системы:

- позволяет получить фотореалистичское изображение проектируемой платы или сборки;

- получить 3D-модель печатной платы в «механической» САД-среде, не поддерживающей IDF-формат – в редких случаях это является актуальным: например, базовая поставка известной 3D-системы SolidWorks не содержит IDF-интерфейса.

Кроме того, следует учитывать, что большинство существующих трансляторов могут строить простейшие 3D-образы компонентов на основе информации, приведенной в проекте печатной платы.

Рассмотрим некоторые решения по интеграции «электронных» и «механических» САД-сред в области 3D-моделирования.

Транслятор Protel DXP/SolidWorks – 3D PCB Modeler позволяет сформировать в SolidWorks 3D-модель печатной платы, разработанной в Protel

DXP. Трансляция осуществляется в три этапа, первый из которых осуществляется в диалоговом, а два оставшихся – в автоматическом режиме:

1. **Настройка трансляции.** Требуется задания параметров трансляции:
 - толщины подложки, проводников, участков локальной металлизации и т.д. (можно активизировать опцию, которая позволит использовать в качестве названных параметров значения, приведенные в проекте ПП);
 - выбор слоя проекта ПП, содержащего контур ПП;
 - выбор слоев проекта с информацией о контурах элементов, модели которых отсутствуют в БД и будут созданы автоматически в формате SolidWorks при трансляции;
 - задание высот компонентов, модели которых будут создаваться автоматически.
2. **Формирование 3D-модели подложки.**
3. **Расстановка 3D-моделей элементов.**

Примеры трансляции компонента из Protel DXP в SolidWorks приведены на рис. 3. На рис. 3, а демонстрируется случай, когда предварительно созданная модель имела в БД 3D-моделей SolidWorks, а пример на рис. 3, б – случай, когда модель предварительно удалили для демонстрации автоматического формирования образа, и она была создана на основании IDF-файла.

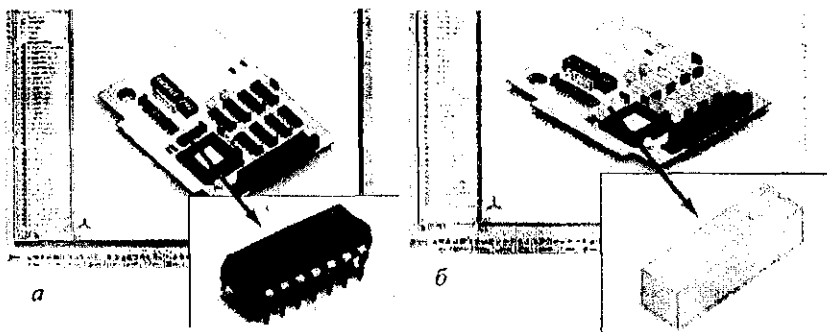


Рис. 3

Особенности транслятора:

- наличие сетевой версии;
- транслируемый из Protel контур печатной платы может быть сложным и содержать не только кусочно-ломаную линию, но и дуги, а

также внутренние вырезы сложной формы (задаются с помощью элементов типа линия и дуга на том же слое, что и контур печатной платы);

– двусторонняя синхронизация проектов при изменении размещения элементов на плате в том или ином пакете [7].

Последняя особенность является существенным преимуществом, т.к. это, во-первых, синхронизация осуществляется намного быстрее, чем новая трансляция всего проекта, а во-вторых, разработчик «остается» в первоначальном проекте, где, возможно, уже были выполнены некоторые разработки корпуса или компоновки устройства. Функцию синхронизации положения элементов в SolidWorks и Protel DXP можно использовать для первичной расстановки элементов «с нуля» в SolidWorks с последующей синхронизацией проекта в Protel DXP – это полезно в случае проектирования устройства со сложным корпусом, для которого в SolidWorks существует 3D-модель.

Транслятор Protel IDF 2D Modeler используется при работе с другими системами 3D-моделирования, для которых не разработаны специализированные конверторы, или в случае работы с несколькими системами одновременно. Транслятор на базе проекта печатной платы формирует IDF-файл. В настройку трансляции, помимо рассмотренных ранее процедур, добавляется выбор версии IDF-формата и «механической» CAD-среды, в которую будет импортирован полученный проект.

Особенностью транслятора является возможность выполнять не только запись, но и чтение IDF-файлов, что позволяет вносить изменения в топологию, получаемую из «механической» CAD-среды, если в ней предусмотрен экспорт проекта сборки в IDF-формат [7].

В версиях Protel начиная с 2004 г. предусмотрена возможность просмотра 3D-моделей ПП, созданных и тем, и другим способом, во встроенном 3D-viewer [5]. Фрагмент 3D-модели печатной платы с импортированными из «механической» CAD-среды образами элементов в режиме просмотра в 3D-viewer представлен на рис. 4.

Аналогичная функция реализована в Altium Designer с дополнительной возможностью перемещать компоненты по плате. Особенно удобно применение данной функции для случаев расположения одних компонентов под другими. При попытке перетащить один компонент, с габаритами больше допустимых, под другой компонент, нависающий сверху, программа подсвечивает перемещаемый компонент и указывает, что выполняется его перемещение в недопустимое пространство. Пример 3D-модели печатной платы в режиме просмотра в Altium Designer показан на рис. 5.



Рис. 4

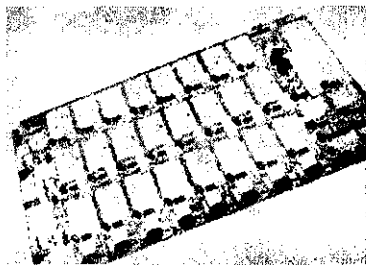


Рис. 5

Транслятор P-CAD WinView IDF представляет собой расширение программы WinView пакета P-CAD и транслирует описание сборок на печатных платах в IDF-формат для связи с любыми «механическими» 3D-средами, которые его поддерживают. Особенности транслятора:

- по экстремальным точкам автоматически обрабатывает только прямоугольные контуры посадочных мест компонентов;

- точные конфигурации корпусов компонентов должны быть заданы замкнутой полилинией в отдельном слое;

- компоненты стандартно для этого метода аппроксимируются наборами прямоугольных параллелепипедов заданной высоты на основании информации из файла библиотеки, но IDF-адаптер 3D-среды автоматически устанавливает реалистичные твердотельные образы компонентов из библиотеки 3D-системы (если есть) [6]. Пример 3D-вида сборки, полученной трансляцией в SolidWorks, приведен на рис. 6.

Транслятор Expedition PCB/SolidWorks. Пакет Expedition PCB является средством САПР ПП в линейке программных продуктов проектирования аналоговых, цифровых СБИС и печатных плат (ПП) фирмы Mentor Graphics. Смешанные проекты (например, при разработке навигационной аппаратуры) часто имеют в своем составе большое количество ПП различных геометрических форм со сложными механическими узлами (крепления, электромагнитные экраны).

Трехмерная параметрическая модель ПП, полностью соответствующая электронной модели ПП, позволяет конструктору на этапе проектирования оценить механические свойства конструкции печатной платы (собственные резонансные частоты, прочность и т.п.) как отдельно, так и в составе блока ап-

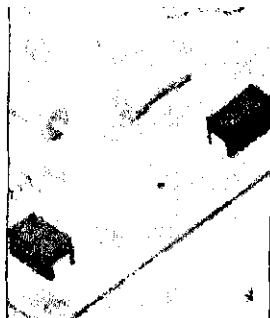


Рис. 6

208958

паратуры. Пример трансляции модели ПП К161 в SolidWorks приведен на рис. 7. Предлагаемое интеграционное решение позволяет в дальнейшем за-

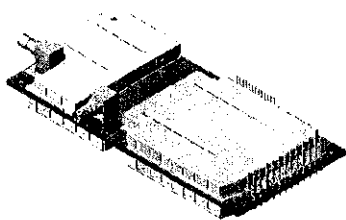


Рис. 7

вершить проектирование разработкой корпусных решений в SolidWorks [19]. Располагая полным набором формообразующих компонент, конструктор создает трехмерные модели деталей. Встроенные программы инженерного анализа дают возможность проверить поведение модели при воздействиях различных механических нагрузок, различных температурных режимах,

рассчитать резонансные частоты и т.д. На следующем этапе можно проверить «собираемость» конструкций, проработать внутриблочный монтаж, промоделировать в движении элементы конструкций. Пример реализации подобных решений приведен на рис. 8. Пошаговая сборка корпуса блока анализатора формы сигналов в SolidWorks – так называемый вид с разнесенными частями – показан на рис. 8, а, готовая трехмерная модель собранного корпуса – на рис. 8, б, а на рис. 8, в приведена фотография реального собранного корпуса, которая в сравнении с 8, б позволяет составить представление о фотореалистичности трехмерной модели.

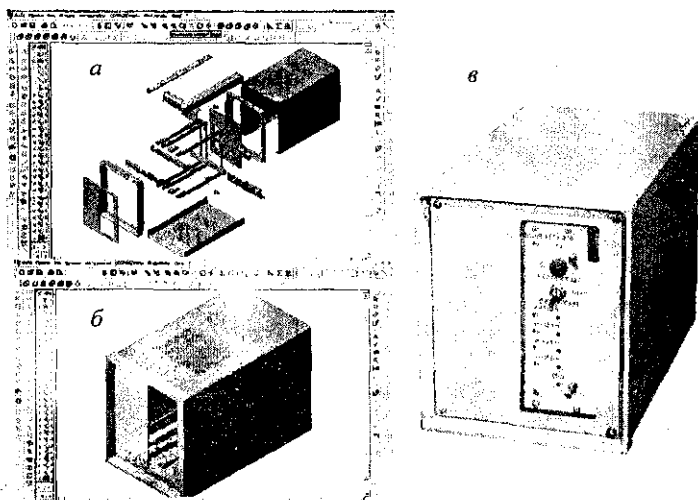


Рис. 8

Конвертор P-CAD/T-FLEX CAD – BRDImport разработан АО «Топ Системы» и вошел в состав T-FLEX CAD 9. Представляет собой конвертор для импорта данных из обменных файлов P-CAD 200x и с последующим созданием трёхмерной модели ПП на базе созданных T-FLEX 3D-моделей элементов. Использование модуля BRDImport начинается с разработки библиотечных моделей ЭРЭ, соответствующих библиотечным элементам P-CAD. Исходными рабочими файлами для модуля BRDImport являются стандартные файлы IDF-формата.

Особенности конвертора:

– исходную систему координат следует размещать, как это принято в САПР ЭУ, в первом выводе, ориентируя её так, чтобы при установке модели ЭРЭ на 3D-модель платы она принимала положение, соответствующее положению ЭРЭ на ПП;

– соответствие библиотечных элементов P-CAD их 3D-моделям в T-FLEX CAD 9 устанавливается по именам.

Последнее следует отнести к недостаткам, поскольку если в библиотеке моделей под именем, например, OMLT_0125, будет сохранена модель микросхемы, то и на модели платы вместо резистора при обращении к библиотеке моделей будет установлена микросхема. В руководстве к конвертору BRDImport особо отмечено, что создание библиотечных элементов как в САПР P-CAD, так и T-FLEX CAD 9 следует поручать квалифицированным и аккуратным сотрудникам.

Примеры 3D-моделей компонентов, созданные в T-FLEX CAD 9 с использованием модуля BRDImport, приведены на рис. 9.

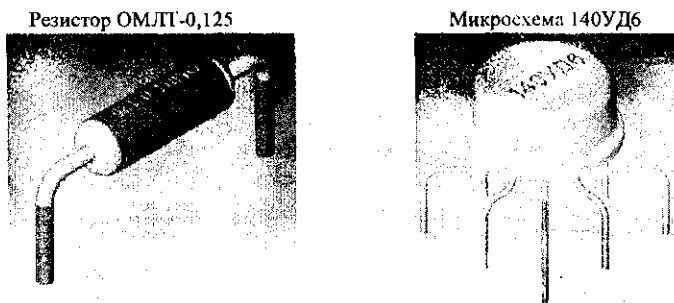


Рис. 9

Результат конвертирования проекта сборки ПП из САПР P-CAD 2002 (исходное представление платы – рис. 10) в 3D-модель ПП в T-FLEX CAD 9 представлен на рис. 11.

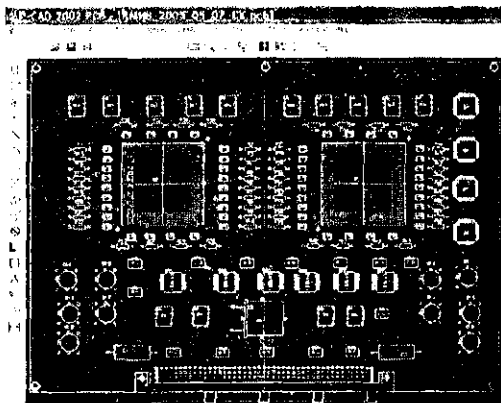


Рис. 10

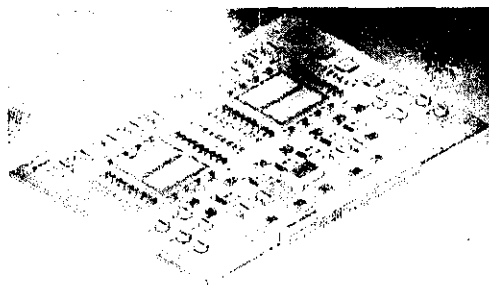


Рис. 11

Узкоспециализированное решение по разработке и верификации трехмерного представления проектируемого устройства РЭС – программу **CADSTAR 3D**, интегрированную в авторский «электронный» пакет CAD-STAR, предлагает компания Zuken.

Особенности программы:

- изменение геометрии платы и размещения на ней компонентов, которые делаются в трехмерной среде, автоматически передаются назад в систему проектирования топологии;
- в дополнение к механическим проверкам выполняются также электрические проверки, такие как проверка зазоров между контактами. По результатам проверки формируется список нарушений правил проектирования, при выборе элемента из которого соответствующий образ в 3D-

модели выделяется подсветкой (результат проверки с демонстрацией конструктивной коллизии в CADSTAR 3D приведен на рис. 12).

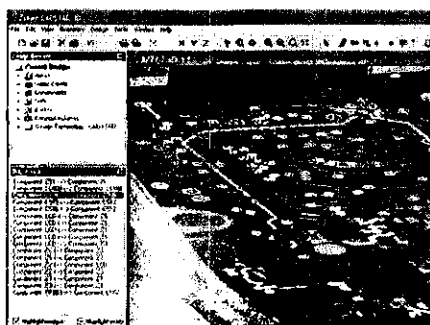


Рис. 12

Программа CADSTAR 3D также обеспечивает возможности построения полных трехмерных изображений для визуальной верификации печатных плат в их механическом окружении. Вся сборка может визуализироваться в режимах каркасного представления, теневой графики или скрытом режиме с удалением линий. Функция визуальных сечений обеспечивает построение видов проекта в разрезе, так что может просматриваться и верифицироваться внутреннее содержимое сборки либо визуально, либо за счет выполнения определенных измерений. Средство измерения способно обеспечить вычисления минимального расстояния между двумя трехмерными объектами, что позволяет выполнять проверку критических зазоров [9]. 3D-модель корпусного узла в CADSTAR 3D с полным набором атрибутов топологического проектирования приведена на рис. 13.

Встречные решения по трансляции специально разработанных библиотек 3D-моделей компонентов и узлов РЭС предлагают разработчики «механических» САД-сред.

Компания АСКОН для решения таких задач разработала новую прикладную библиотеку «Конвертор из eCAD в КОМПАС 3D для печатных плат». Особенностью этого конвертора является то, что для элементов с одинаковым типом корпуса создается специальный файл соответствия для исключения многократного дублирования одинаковых образов. Результат работы конвертора: 3D-модель печатной платы в КОМПАС-3D, созданная с использованием библиотечных моделей компонентов, показана на рис. 14. Модель той же платы, но полученная на основании автоматически сформированных моделей компонентов по данным IDF-формата, приведена на рис. 15.

3.1.3. Анализ тепловых и электромагнитных процессов с использованием 3D-моделирования

Одной из основных задач проектирования РЭС является теплотехнический анализ проектов. Расчет тепловых режимов электронного оборудования представляет собой чрезвычайно важную задачу с точки зрения надежности, т.к. повышение температуры перехода полупроводникового устройства увеличивает вероятность отказа, которая имеет экспоненциальную зависимость от температуры.

Исследования тепловых режимов тесно связаны с процедурами компоновки блоков РЭС конструктивными узлами (печатными узлами, функциональными ячейками, узлами радиаторов и т.п.). С точки зрения теплового анализа картина представляется следующей: с одной стороны плотность монтажа и мощности растут, с другой – повышается чувствительность элементной базы к температуре. В этой ситуации становится все сложнее делать «правильную» компоновку элементов на ПП. Итерационные процедуры в цикле «конструктивная компоновка – тепловой анализ» могут быть эффективно реализованы с использованием 3D-моделей конструкций как верхних, так и нижних уровней конструктивной иерархии РЭС при интеграции «электронных» и «механических» САД-сред с программными модулями теплового анализа.

Применяемая в большинстве программ теплового анализа технология использует аналогию между тепловыми и электрическими процессами. Отдельные части устройства представляются в виде узлов с заданной теплоемкостью, связанных между собой ветвями с заданной теплопроводностью, что в терминах электрических схем представляет собой не что иное, как набор конденсаторов, соединенных проводами с ненулевым сопротивлением, т.е. RC-цепочек. В современных программах теплового анализа устройство рассматривается как трехмерный объект, разбиваемый на элементарные области, геометрические центры которых считаются тепловыми узлами. Температура в таком элементарном объеме считается одинаковой и имеет аналогом напряжение в электрической схеме. Теплоемкость объема (по зарубежной терминологии – тепловая масса) представляется в виде конденсатора. Тепловой поток аналогичен электрическому току. Рассчитанные таким образом температуры в узлах схемы позволяют построить интерполяционную модель всего устройства и определить температуру в любой его точке [17, 20].

Системы теплового анализа, как правило, представляют собой автономные приложения к конкретной САПР ПП. С точки зрения интеграции интерес представляет *BETAsoft Board* компании Dynamic Soft Analysis. Ее по-

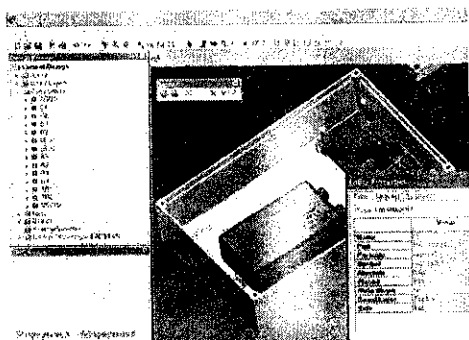


Рис. 13

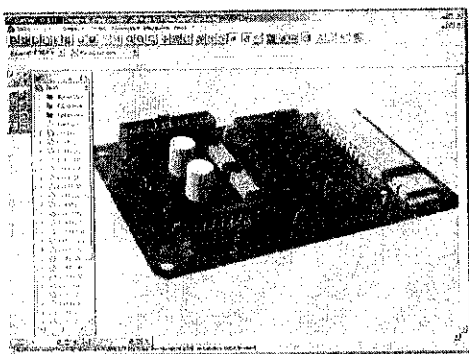


Рис. 14

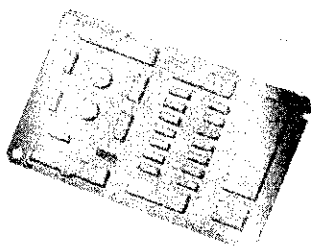


Рис. 15

пулярность определяется высокой достоверностью получаемых результатов и наличием встроенного интерфейса связи с большинством САПР ПП (такими как P-CAD, PADS, OrCAD, Protel и проч.). Особенности программы:

- используются численные методы, основанные на принципах конечных элементов с адаптивными сетками, генерирующие адаптивные местные сетки, для того чтобы не допускать снижения точности на мелких деталях проекта, не попадающих в основную сетку платы (преимущество расчета по конечно-элементной схеме – повышенное быстродействие анализа при высокой точности);
- реализовано моделирование воздушной конвекции с учетом трехмерного расположения компонентов на плате [18].

Итерационный процесс оптимизации топологии по результатам теплового анализа в VETAsoft Board реализован следующими методами:

- перемещение компонентов, изменение направления воздушных потоков и изменение толщины экранных слоев;
- добавление элементов теплоотводов: радиаторов и теплопроводящих подложек, а также теплопроводящих креплений компонентов;
- добавлений локальных участков металлизации и изменение параметров термобарьеров.

На рис. 16 показаны результаты работы VETAsoft Board в виде построенных карты температур компонентов (рис. 16, а) и карты прогрева печатной платы (рис. 16, б).

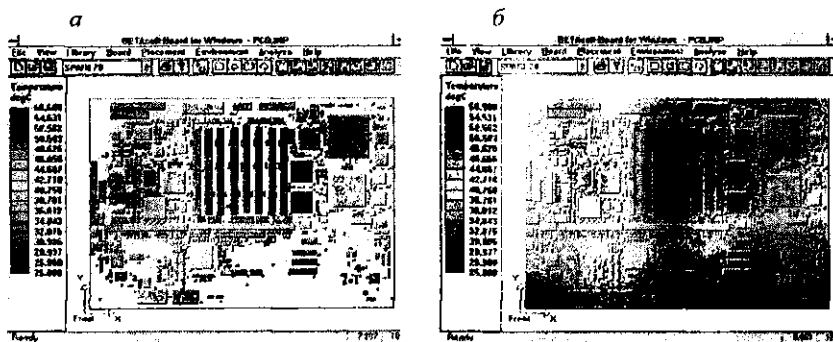


Рис. 16

На рис. 17 показан результат поиска в VETAsoft Board перегреваемых компонентов по заданным индивидуально для каждого компонента предельно допустимым температурам.

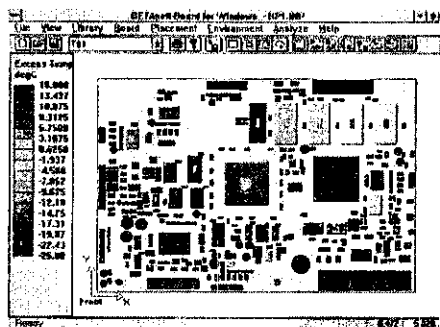


Рис. 17

Аналогичные интеграционные решения предлагает компания Harvard Thermal Inc. Два программных продукта – *TAS* (программа анализа трехмерных конструкций произвольной формы) и *TASPCB* (тепловой анализ печатных плат) позволяют решить задачи теплового моделирования процессов в многослойных и объемных структурах конструкций РЭС.

Программа *TASPCB* обеспечивает два способа создания проекта: импорт проектных данных из «электронной» CAD-среды (поддерживает все популярные форматы) или построение модели платы с помощью собственного редактора. В программе можно получить карту прогрева каждого слоя многослойной структуры с учетом элементов топологии, компонентов, крепежа, вырезов, ребер жесткости, теплоотводов, кожухов, интенсивности и направления воздушного потока. Особенности программы:

- встроенные средства прогнозирования и оптимизации тепловых моделей, в т.ч. и конвективного теплообмена;

- используются численные методы, основанные на принципах конечных элементов, причем сетки для платы и воздушной среды создаются автоматически и независимо, что обеспечивает повышение быстродействия.

TASPCB осуществляет прогноз:

- температур паяк электронных компонентов и печатных дорожек;
- рассеяния мощности, вызванного электрическим напряжением;
- влияния количества и расположения перемычек между слоями;
- эффективности вариантов теплоотводов;
- влияния расположения компонентов;
- влияния изменений толщины слоя меди в печатной плате;
- влияния прикрепления или пайки компонентов к плате.

Реализованный в TASPСВ трехмерный анализ позволяет рассчитать движение воздуха над платой и теплоотдачу от платы и электронных компонентов. Встроенные средства позволяют реализовать и оценить различные варианты разрешения проблемы, например:

- добавить теплоотвод из библиотеки,
- прикрепить или припаять компонент к плате,
- добавить теплопроводящую конструкцию,
- увеличить приток воздуха,
- добавить тепловые перемычки под компонентом.

Пример карты распределения температур фрагмента 3D модели печатной платы, полученной в TASPСВ, приведен на рис. 18.

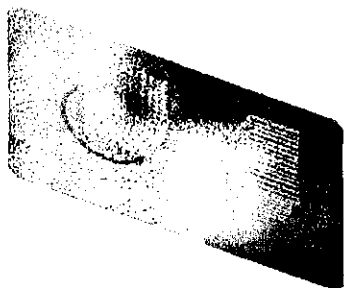


Рис. 18

Как уже отмечалось, обязательным структурным элементом САПР ВЧ и СВЧ аппаратуры является модуль электромагнитного моделирования (так называемые EM-симулятор), обеспечивающий точность расчета частотных характеристик. Современные программные продукты САПР ВЧ и СВЧ позволяют выполнять EM-анализ, в т.ч. и в трехмерных структурах.

Система 3D электромагнитного моделирования FEKO ком-

пании EMSS (ЮАР), в отличие от аналогичных продуктов (Microwave Office, HFSS и т.д.), сочетает стандартный численный метод решения трехмерных электродинамических задач – метод моментов – с приближенными аналитическими методами: методом физической оптики и однородной теорией дифракции. Такое сочетание позволяет преодолеть главный недостаток программ компьютерного моделирования высокочастотных структур: большие затраты ресурсов при моделировании объектов с размерами много большими длины волны. В результате появляется возможность решения таких задач, как рассеяние радиоволн на самолете или корабле, распространение радиоволн в городских условиях с хорошей точностью и т.п.

Метод моментов (MoM) предусматривает следующие этапы решения электродинамической задачи. Металлические элементы анализируемой структуры заменяются эквивалентными электрическими поверхностными токами. Затем решается задача возбуждения окружающей среды данными

тока. При этом среда может быть сложной, т.е. может содержать магнито-диэлектрические слои. Важным моментом решения является разбиение поверхности металла на элементарные площадки-ячейки и аппроксимация электрического тока в пределах площадки.

В программе FEKO элементарная площадка имеет треугольную форму, что позволяет хорошо описывать, в т.ч. и искривленные поверхности.

Точность МоМ тем выше, чем меньше размер элементарной площадки. Считается, что для получения приемлемой точности размер площадки не должен превышать $L/10$, где L – длина волны в свободном пространстве. Количество уравнений в СЛАУ равно числу элементарных площадок N , которое неизбежно увеличивается при увеличении размеров анализируемого объекта или при увеличении частоты. Поэтому непосредственное решение задачи типа рассеяния радиоволн на большом объекте (самолете, автомобиле) с помощью МоМ потребует решения СЛАУ огромной размерности. На практике оно просто невозможно из-за ограниченной оперативной памяти ЭВМ.

Метод физической оптики (метод Кирхгофа) – это классический метод приближенного решения электродинамических задач, в котором ток приближенно вычисляется через магнитное поле падающей на объект волны. МФО хорошо работает при решении задач рассеяния плоских волн на объектах больших размеров. При уменьшении размеров объекта аппроксимация тока магнитным полем падающей волны становится неверной.

Для сложных объектов, с размерами, значительно больше длины волны, используют однородную теорию дифракции – более современный метод приближенного решения задач рассеяния волн на больших объектах. В рамках этого метода поверхность объекта представляется набором плоских многоугольников, имеющих общие ребра. Поле, рассеянное многоугольником, разделяется на две составляющие: часть, порожденная плоской поверхностью и поле порожденное ребрами. Метод ОТД считается более точным, чем МФО и имеет примерно те же пределы применимости.

В 3D EM-моделировании одной из основных задач является разбиение 3-х мерной поверхности на элементарные плоские фрагменты, например, триангуляцией. В FEKO геометрия простых структур задается с помощью карт геометрии, описываемых на внутреннем языке FEKO. Для сложных структур предусмотрен импорт стандартных файлов стороннего ПО, описывающих трехмерные структуры и их разбиение сетками (ACIS, Parasolid, IGES, DXF).

Сочетание различных методов позволяет решать с использованием FEKO такие задачи, как точный расчет радиолокационных систем для

больших объектов; расчет поля, наводимого антенной мобильного телефона в передающем режиме в голове человека (рис. 19), а также задачи, сочетающие в себе анализ мелко- и крупноразмерных структур [13].

Еще одним примером удачного комбинирования различных методов ЭМ-моделирования в трехмерных структурах является программа *Microwave Studio*, разработчиком которой является фирма CST (Computer Simulation Technology). Особенности программы:

- в программе реализован собственный редактор 3D-моделей (см. пример 3D модели спиральной антенны, реализованной встроенными средствами *Microwave Studio*, на рис. 20);

- для решения задач ЭМ-моделирования в программе используется разработанный компанией CST метод аппроксимации для идеальных граничных условий (РВА), удачно дополняющий хорошо зарекомендовавший себя метод определенных интегралов (FI), работающий во временной области.

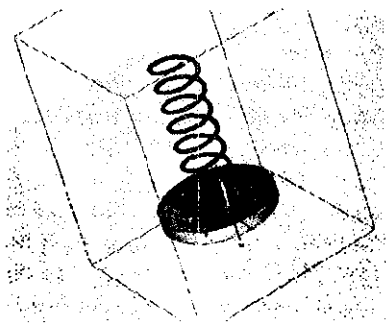


Рис. 20

Комбинация методов РВА и FI, позволяет с приемлемым быстродействием решать задачи моделирования СВЧ устройств с криволинейными

поверхностями на ПК обычной конфигурации. В других подобных программах решение задачи ведется в частотной области. Такой метод требует предварительного задания сетки частот и не дает возможности получить решение задачи на промежуточных частотах.

Возможности программы CST обеспечили ее преимущества при проектировании антенн для систем спутниковой навигации, которые имеют физические размеры в несколько раз меньше длины волны в свободном пространстве. Такие антенны по своей сути являются резонансными приборами, и обладают рядом свойств, присущих резонаторам. Одно из этих свойств – это высокая добротность, и как следствие, сравнительно узкая полоса. Благодаря комбинации методов расчета, применяемым в Microwave Studio, можно получить высокую точность расчета в широкой полосе частот, а не только в заданных точках расчета, как это происходит в других программах [15].

Программа EM-моделирования IE3D компании Zeland расширяет сферу применения метода моментов (МоМ) за счет возможности построения наклонных вертикальных стенок, связывающих металлические сигналонесущие слои. Тем самым, в IE3D метод анализа планарных структур расширен для расчета принципиально трехмерных структур [14].

В IE3D возможно моделирование трехмерных конструкций с несколькими диэлектрическими уровнями, охваченными излучаемой, замкнутой или периодической границами излучения. Разбиение металлических форм на элементарные площадки выполняется автоматически, генерированием неравномерной сети с прямоугольными и треугольными ячейками. Прямоугольные ячейки используются в регулярных областях, треугольные – на сложных граничных областях. Трехмерное решение задачи EM-моделирования в IE3D обеспечивает повышенную точность моделирования микрополосковых структур, в которых ток концентрируется не только на одной, нижней, поверхности, а на 2-х и более (например, в полосковых фильтрах).

Все средства теплового и EM-моделирования, реализованные с использованием методов конечных элементов, требуют осуществления чрезвычайно большого объема вычислительных процедур. В связи с этим актуальным является ускорение анализа и повышения качества результатов расчета. Рассмотренные выше примеры демонстрируют решение данной задачи с использованием сочетания различных методов приближенных расчетов или оптимизацией алгоритмов.

Фирма Sonnet Software предлагает другое решение данной проблемы – вычислительную технологию emCluster для нужд EM-моделирования.

Система emCluster может быть сконфигурирована для работы как в сосредоточенном локальном кластере, так и в распределенной или объединенной вычислительной среде через Интернет. В отличие от традиционных кластеров, система может работать в гетерогенных вычислительных средах, вплоть до объединенных массивов компьютеров (вычислительных решеток), т.е. технология emCluster объединяет различные аспекты кластерной, распределенной и решетчатой компьютерной обработки.

При традиционной организации EM-анализа частоты анализируются последовательно, одна за другой. При использовании программы Sonnet emCluster в кластерной вычислительной среде вся задача анализа в диапазоне изменения частоты автоматически разделяется на соответствующее число одночастотных расчётных заданий, полностью подготовленных для обработки вычислительным ядром Sonnet. Эти отдельные задания назначаются системой emCluster для параллельной обработки на доступных в кластере ресурсах. Главным критерием, по которому программа emCluster автоматически распределяет задания для обработки между компьютерами (серверами моделирования), является соответствие их характеристик требованиям конкретного задания (например, доступная оперативная память). Такое распределение значительно сокращает общее время ожидания и обеспечивает наличие «всегда включённых» ресурсов. После того, как кластер проанализирует все одночастотные задания, программа emCluster объединяет результаты расчётов и получает окончательные характеристики устройства.

Технология emCluster также может быть использована для повышения эффективности работы алгоритма Adaptive Band Synthesis (ABS). Фактически это метод интерполяции, обеспечивающий получение характеристик с высоким разрешением по частоте в широком диапазоне по результатам EM анализа структуры в небольшом количестве точек. Пакет Sonnet проводит полный EM анализ в нескольких отдельных точках и использует полученные внутренние данные для синтеза характеристик в широкой полосе частот с более высоким разрешением. Существует два основных метода исполнения алгоритма ABS с применением программы emCluster. Первый из них, автоматический, позволяет программе emCluster самой определить, для каких именно дискретных точек выполнить полный EM анализ, и запустить одночастотные задания для параллельного расчета в кластере. Второй метод требует ручного задания конкретных частотных точек или шага по частоте во всем диапазоне. Для полученных частотных точек программа emCluster сформирует задания для расчета в кластере, запустит анализ и, по его завершении, получит интерполированную частотную ха-

рактеристику с использованием алгоритма ABS. Для анализа типичных проектов в системе Sonnet с использованием алгоритма ABS разработчики рекомендуют кластер из десяти компьютеров.

Для демонстрации эффективности программы emCluster разработчики приводят пример гибридного делителя мощности размером $0,5 \times 0,5$ мм (рис. 21). В этом 3 дБ-синфазном делителе мощности используются две спиральных катушки индуктивности на арсенид-галлиевой подложке. Подобные криволинейные структуры традиционно представляют серьёзное испытание для систем EM-моделирования, которые пытаются заполнить криволинейную структуру большим числом мелких ячеек анализа, что резко увеличивает время анализа.

Анализ десяти частотных точек на персональном компьютере с процессором Pentium-4 1.8GHz и оперативной памятью 2 ГБ при выборе мелких ячеек (для обеспечения высокой точности) занимает 9 ч 41 мин. Расчёт той же структуры с помощью программы emCluster, выполняемый на кластере, состоящем из десяти таких же компьютеров, занимает 1 ч. Программа emCluster автоматически делит все задание на 10 одночастотных и назначает их на выполнение доступным компьютерам кластера [21]. Результат расчета плотности поверхностных токов, полученный с использованием системы emCluster, приведен на рис. 22.

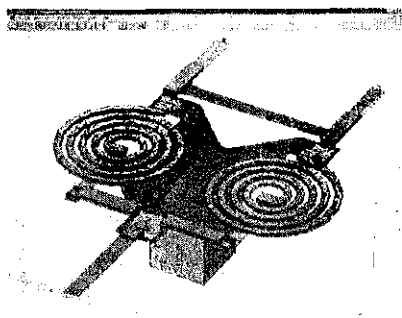


Рис. 21

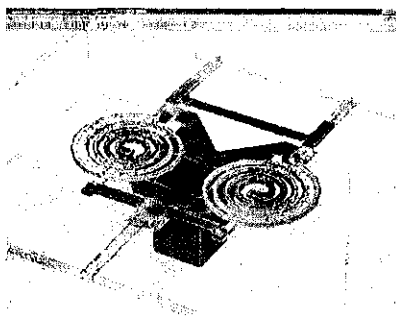


Рис. 22

3.2. Быстрое прототипирование

В процессе комплексного проектирования даже с использованием виртуальной 3D-модели трудно выявить все ошибки и недостатки проекта. Дополнительные возможности для анализа проектируемого изделия пре-

доставляют реальные физические модели – *прототипы*. Прототип изделия можно использовать в качестве концептуальной модели, для функциональных тестов, изготовления инструментальной оснастки, в маркетинговых целях или при определении стоимости изготовления. Кроме того, физические модели проектируемых изделий усиливают связь и взаимопонимание между проектировщиками и заказчиками, сокращая время выхода продукта на рынок, и служат дополнительным средством проверки дизайнерских решений с точки зрения эргономики.

Быстрым прототипированием (Rapid Prototyping – RP) называются автоматическое преобразование виртуальной 3D-модели в реальный твердотельный физический объект с использованием так называемых *аддитивных технологий* (от английского «add» – прибавлять). Такие технологии являются современной перспективной альтернативой традиционным методам твердотельного натурального моделирования – *субтрактивных технологиям* (от английского «subtract» – отнимать, вычитать) [23 – 25].

3.2.1. Традиционные субтрактивные технологии твердотельного прототипирования

К субтрактивным технологиям относятся способы получения физических моделей изделий путем изготовления из легко обрабатываемых материалов, вручную или автоматически на обрабатывающих станках с ЧПУ, способом удаления «лишнего» материала заготовки. На прототипирование таким способом затрачивается значительное время. Кроме этого, субтрактивным технологиям присущ ряд недостатков, в частности ограниченный ассортимент форм, поддающихся реализации, а также чрезвычайная сложность или невозможность создания на их основе асимметричных, вложенных друг в друга фигур [24, 25].

Тем не менее, современные портативные решения в области субтрактивных технологий достаточно просты, дешевы и компактны. Станки с ЧПУ или CNC-станки (Computer Numerically Controlled) управляются непосредственно из 3D CAD-сред и позволяют создавать в материале 3D-модели, которые в этих средах разрабатываются. Материалы могут быть почти любые – от пластика или дерева до мягких металлов (бронза, алюминий).

Станки с ЧПУ делятся на три основных вида: токарные (lathes), роутеры (routers) и фрезерные (mills). Вид современного компьютеризированного токарного станка Flashcut приведен на рис. 23.

Различие станков с ЧПУ состоит в способе обеспечения трех степеней свободы при обработке (рис. 24, а – для фрезерного станка; рис. 24, б – для станка-роутера).

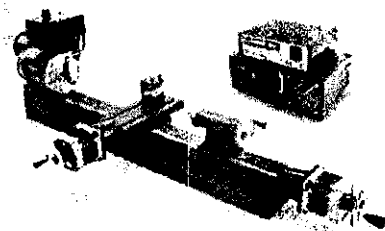


Рис. 23

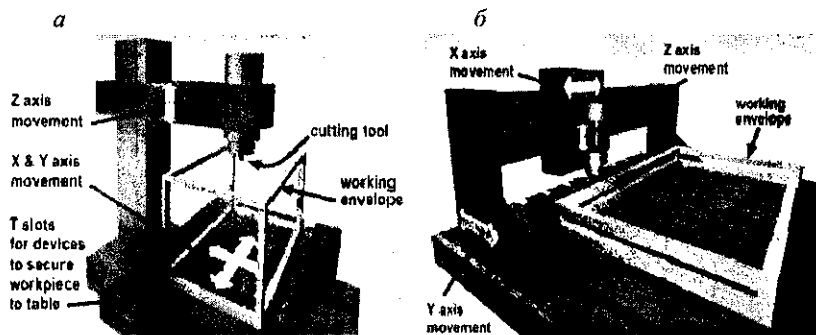


Рис. 24

Компактные станки с ЧПУ используются для непосредственного изготовления прототипов по трехмерным моделям и подготовки форм для литья, а также быстрого изготовления печатных плат (без фотошаблонов и травления). Например, сверлильно-фрезерный станок *MicroMill 2000 Desktop Machining System* от MicroProto, приведенный на рис. 25, а, подключается к компьютеру вместо принтера, может обрабатывать объем 23x14x15 см и способен позиционировать инструмент с точностью до сотых долей миллиметра. Станок обрабатывает алюминий и даже мягкие стали. Фотография детали, полученной на этом станке по переданной из CAD-среды 3D-модели, – рис. 25, б.

Другой пример подобных устройств – станок *MDX-20* от компании Roland (рис. 26), который также позволяет обрабатывать различные материалы вплоть до алюминия и бронзы, имеет размер рабочей зоны 15x10x6 см и точность порядка сотых долей миллиметра. К компьютеру подключается через последовательный порт. Дополнительно Roland предоставляет к своим станкам пьезоэлектрическую сканирующую головку, которая позволяет делать

обратное преобразование – переводить реальные предметы в компьютерные трехмерные модели, т.е. реализует трехмерное сканирование [24].

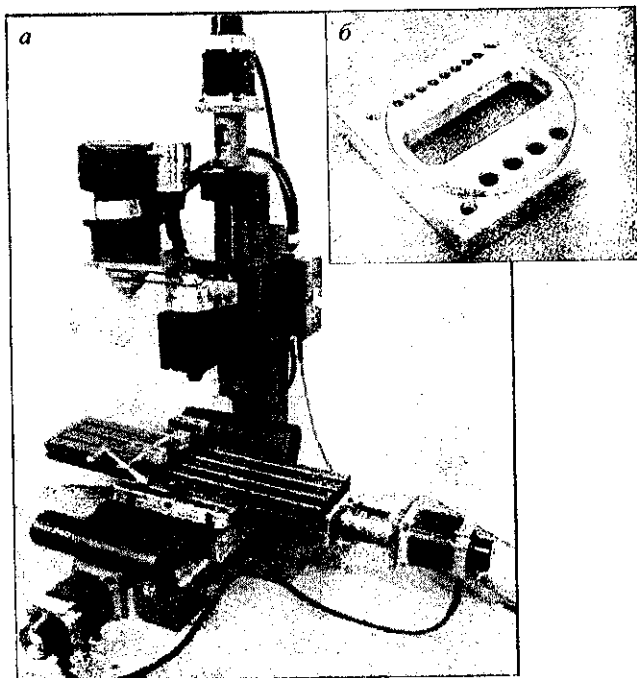


Рис. 25

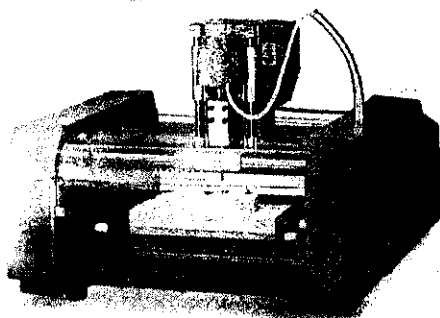


Рис. 26

В последние годы появились субтрактивные технологические решения и в области микроэлектроники. Так, фирма *Revisé* разработала процесс трехмерной инверсной стереолитографии, основанный на лазерном микрохимическом травлении исходного материала. Суть процесса состоит в плавлении микроскопической области материала с помощью узкофокусированного лазерного пучка в присутствии газообразного химического реагента. Подаваемый под высоким давлением газ-реагент образует с расплавленным материалом устойчивое химическое соединение, которое удаляется из зоны реакции. Фирмой создана установка *9900 FIB ASSISTANT* для лазерной обработки кремниевых заготовок в присутствии хлора. Благодаря уникальным теплопроводным свойствам кремния размер его расплавленной области может составлять всего несколько кубических микрон, причем за пределами этой области его кристаллическая решетка не изменяется. Толщина удаляемого слоя равна 1 – 8 мкм, шероховатость вытравленных поверхностей не превышает 30 нм. Вытравливание кремния возможно на различных уровнях независимо друг от друга, что позволяет создавать различные трехмерные микроформы. Основное назначение установки – серийное производство кремниевых микроэлектромеханических систем (МЭМС) и трехмерная обработка кремниевых пластин [22].

3.2.2. Аддитивный алгоритм и стандартизация быстрого прототипирования

В аддитивных технологиях быстрого прототипирования формообразующая жидкость, листовая или мелкодисперсный порошок материал последовательно послойно формируют уровни синтезируемого объекта. Процессы быстрого прототипирования не имеют формообразующих ограничений: с их использованием можно создавать внутренние и даже подвижные части изделия, и более быстродействующие (в 10 – 100 раз), нежели субтрактивные: готовый прототип можно изготовить за несколько часов.

В настоящее время на рынке существуют различные RP-системы, производящие модели по различным технологиям и из различных материалов. Однако, все современные системы быстрого прототипирования, реализуют трехэтапный алгоритм построения физической модели:

- импортное трéхмерной геометрии из 3D CAD-системы в стандартный формат систем быстрого прототипирования – STL (рис. 27, а);
- разбиение трéхмерной модели на поперечные сечения (слои) с помощью специальной программы, поставляемой с оборудованием или используемой как приложение (рис. 27, б);

– построение сечений детали слой за слоем снизу вверх, до тех пор, пока не будет получен физический прототип модели.

Слои физически связываются между собой. Построение прототипа продолжается до тех пор, пока поступают данные о сечениях CAD-модели [23].

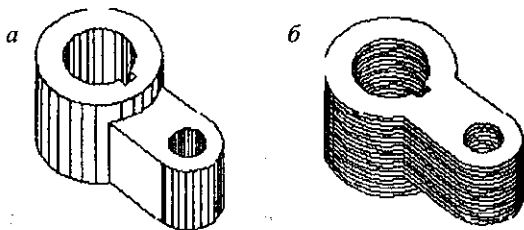


Рис. 27

В 1972 году на фирме Mitsubishi был разработан процесс формирования трехмерных топографических карт с применением фотополимеризующейся резины. В 1974-ом с помощью аддитивных методов впервые начали изготавливать объекты, поверхности которых трудно сфабриковать машинной обработкой: пропеллеры самолетов, трехмерные кулачки со сложными профилями и т.п. В начале 70-х годов был предложен порошковый процесс, имеющий много общего с современными лазерными методами поверхностного синтеза. При формировании объекта этим методом мелкие частицы подаются к матрице либо самотеком, под действием магнитостатической или электростатической силы, либо с помощью сопла. Лазерным, электронным или плазменным пучком частицы локально нагреваются, образуя в результате сцепления друг с другом непрерывный слой (рис. 28). Для увеличения силы связи частиц можно использовать несколько синхронно работающих источников тепла, например, лазеров.

Как уже отмечалось в разделах 2.2 и 3.1, интеграция различных CAD/CAE/CAM реализуется с учетом множественности форматов представления результатов проектирования – как стандартных, так и форматов различных разработчиков, что вызывает необходимость дополнительно решать вопросы конвертирования данных при обмене. В индустрии быстрого прототипирования безраздельно господствует единственный формат – STL (STereoLithography – объемная литография). Формат STL был создан компанией Albert Consulting group, которая занималась разработкой первого алгоритма послойной обработки по заказу компании 3D Systems. В 1987

году компания 3D Systems открыто опубликовала STL-формат. Этот достаточно нетрадиционный для большинства технологических компаний шаг обеспечил поддержку формата со стороны CAD-компаний, работающих в области 3D-проектирования. В результате STL стал стандартом для передачи данных в установки быстрого прототипирования.

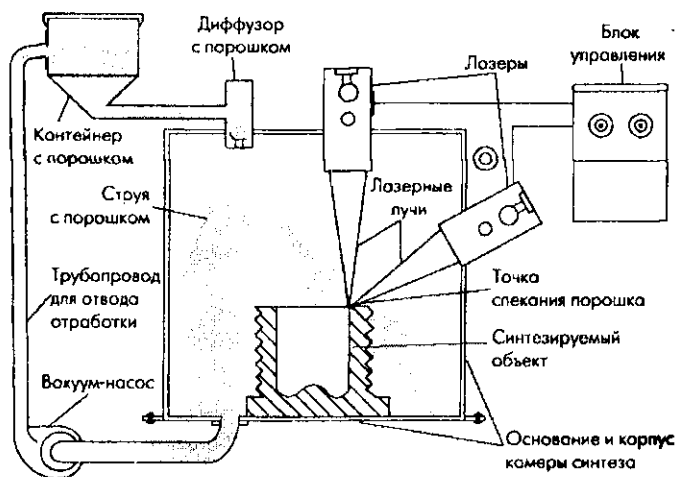


Рис. 28

Трёхмерная геометрия в 3D CAD-системах описывается поверхностями высокого порядка. Для представления формы цифровой 3D-модели STL-формат использует последовательность треугольников (фасетов), т.е. поверхность модели триангуляцией разбивается на маленькие треугольники. Описание каждого треугольника включает описание единичного вектора нормали и трёхмерные координаты вершин.

Различают два типа STL-форматов: текстовый (ASCII) и бинарный. Бинарный вариант файла занимает меньше места и точнее, чем текстовый. В свою очередь текстовый вариант можно переносить на компьютер с другим представлением чисел [26].

Основным требованием, которое предъявляется к функциональности 3D CAD-среды, поддерживающей вывод данных в STL-формате, является обеспечение заданной точности при создании физического прототипа 3D-модели. Замена точной 3D-поверхности триангулированной полигональной сеткой всегда требует определенной аппроксимации и преобразования

данных, следовательно, наиболее критичным фактором является разрешение и способы управления этим параметром.

Управление разрешением в различных CAD-средах осуществляется по-разному, но в основном можно управлять размерами треугольников, а также тем, как система обрабатывает закругления на модели (скругления, отверстия и т.д.). Дополнительными факторами, обеспечивающими конкурентное преимущество CAD-среды в представлении моделей в STL-формате, являются способности системы:

- выводить STL-файлы для сборочных моделей. Существуют два способа: 1) весь узел может выводиться в один STL-файл, который содержит все выбранные детали в виде отдельных тел или оболочек (реализован в большинстве систем); 2) система обрабатывает сборочную модель и выводит каждую деталь в отдельный STL-файл;

- обеспечивать предварительный просмотр и визуализацию сетки перед выводом окончательного варианта STL-файла.

Из наиболее удачных решений по всем факторам сравнения следует отметить пакеты Pro/ENGINEER и SolidWorks: они обеспечивают высокое качество STL-вывода для деталей, а также хорошие возможности управления процессом. В то же время качество вывода сборок в этих пакетах недостаточно высокое. Однако оба пакета предоставляют пользователям инструменты для вывода деталей из сборок с генерацией отдельного файла для каждой детали. Кроме того, включенные в SolidWorks функции проверки пересечения деталей должны помочь избежать ошибок при создании STL-файлов, содержащих несколько деталей. Другие системы тоже имеют подобные инструменты, но они еще не интегрированы в процесс вывода и их применение требует ручных настроек.

Разработчики технологий быстрого прототипирования выделяют несколько типичных проблем, возникающих при экспорте данных из 3D-сред в формат STL. Первая из них связана с полигонально-сеточной природой самого формата, из-за которой STL-файлы всегда являются аппроксимацией полной 3D-модели. Выбор оптимального разрешения особенно важен для неплоской геометрии. Если аппроксимация компьютерной 3D-модели будет достаточно грубой, то на физическом прототипе будут видны фасеты, из которых состоит сетка (прототип будет «граненым»). Эти фасеты можно удалить на стадии финальной доработки, но это требует дополнительных затрат, а также есть опасность потерять мелкие элементы детали, или случайно удалить материал, который удалять нельзя.

Вторая проблема -- ошибки в STL-файлах, из которых наиболее типичны следующие:

– часть треугольников в STL-файле имеет неправильные направления нормалей (в этом случае программное обеспечение, отвечающее за генерацию управляющих данных о форме каждого слоя для установки быстрого прототипирования, будет добавлять материал вне объема прототипа, а не внутри);

– неверная стыковка треугольников, что приводит к неправильному воспроизведению при прототипировании отдельных ребер или контуров.

Следует отметить, что такие ошибки обычно возникают только в сложных проектах и сборках, а отдельные детали большинство CAD-систем импортируют в STL-формат безошибочно. Тем не менее, для совершенствования интеграции, разработчики технологий и оборудования быстрого прототипирования предлагают авторское ПО верификации и редактированию STL-данных. Одним из таких решений является программа *Magics 9.5* компании Materialise, позволяющая выявить и устранить ошибки в STL-файлах.

Потенциальные возможности улучшения интеграции CAD-сред и программного обеспечения технологий быстрого прототипирования лежат в сфере реализации в интерфейсах CAD-систем функций непосредственной передачи данных на оборудование быстрого прототипирования конкретного типа. Одно из первых таких решений было анонсировано в пресс-релизе компании 3D Systems, которая под свой 3D-принтер InVision разработала такой интерфейс для SolidWorks и объявила о возможности аналогичных разработок для любой CAD-среды, выбранной клиентом [23, 26]. После инсталляции упомянутого интерфейса для SolidWorks (он устанавливается вместе с программным обеспечением 3D-принтера InVision) в меню добавляется новый пункт – Send to InVision. При выборе этого пункта появляется окно предпросмотра (print preview) модели, подготовленной к реализации на InVision. Далее пользователь может, при желании, перевести, отмасштабировать или скопировать модель, после чего автоматически генерируется STL-файл, который и отсылается в очередь реализации на InVision.

3.2.3. Технологии быстрого прототипирования

Современные установки быстрого аддитивного прототипирования реализуют свыше 30 различных технологических процессов, среди которых наиболее проработаны следующие:

- стереолитография (StereoLithography, SL);
- селективное лазерное спекание (Selective Laser Sintering, SLS);
- ламинирование (Laminated Object Manufacturing, LOM);

– сплавляющее экструдерное осаждение (Fused Deposition Modeling, FDM);

– различные технологии трехмерной струйной печати.

Перечисленные технологии наиболее активно продвигаются на мировой рынок установок быстрого прототипирования [25].

Стереолитография, или SL-технология, – самая известная технология быстрого прототипирования. Общепризнанный лидер в области стереолитографии – компания 3D Systems (США), основатель которой Чарльз Халл (Charles Hull) изобрел и запатентовал технологию в 1986 году. Оборудование для стереолитографии выпускают следующие компании: немецкая EOS GmbH, японские Sony-DMEC и Mitsui Engineering, а также несколько других.

Установка быстрого прототипирования, реализующая технологию стереолитографии, состоит из четырех основных блоков: процессора построения сечений, управляющего процессора, камеры синтеза и лазерного блока. Процессор построения сечений преобразует данные файла 3D-модели в STL-файл. По данным этого файла управляющий процессор на протяжении всего процесса синтеза контролирует перемещения механических узлов установки. Камера синтеза представляет собой резервуар, заполняемый жидким фотоотверждаемым полимером (рис. 29).

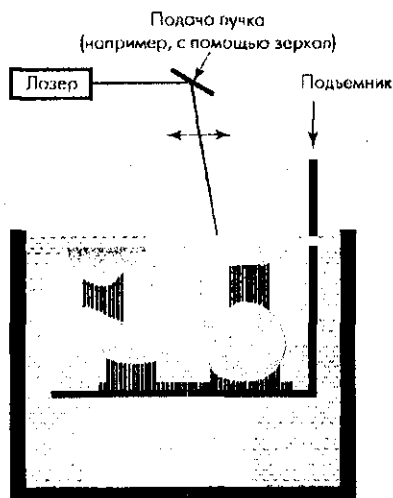


Рис. 29

Внутри резервуара по командам управляющего процессора в вертикальном направлении перемещается опорная платформа (эlevator). В исходном состоянии зазор между рабочей поверхностью элеватора и поверхностью жидкого полимера равен толщине первого слоя синтезируемого объекта. С началом синтеза лазерный луч вычерчивает на поверхности полимера сечение модели. Фотополимерная жидкость под действием лазерного излучения отвердевает. После того, как лазерный луч полностью создаст первый слой, эlevator опускается на один уровень и процесс повторяется. По завершении синтеза заготовка модели удаляется из резервуара и для обеспечения заданной прочности обрабатывается мощным УФ-излучением. Для поддержки выступающих фрагментов модели в ходе формирования последующих уровней используются опорные элементы, образуемые точечной лазерной засветкой фотополимера. После завершения синтеза объекта эти элементы удаляются.

Готовые модели выдерживают нагрев до 100 °С без изменения формы и размеров. Шероховатость поверхности без обработки не превышает 100 мкм. Отвердевший фотополимер легко полируется. Прочность готовых деталей сравнима с прочностью изделий из отвержденных эпоксидных смол [23, 25]. К недостаткам технологии следует отнести высокую стоимость оборудования и расходных материалов (цена установки – сотни тысяч долларов). Кроме того, обрабатываемый материал ограничивается только фотополимерами.

Представляют интерес разработки более скоростных вариантов стереолитографии: один из них первоначально был разработан компанией Cubital Inc. Назывался он Solid Ground Curing или, сокращенно, SGC. В качестве рабочего материала в предлагаемом решении также использовался фотополимер, но засветка производилась ультрафиолетовой лампой сразу для всего рабочего слоя через фотошаблон, который печатался на стекле. Сейчас систему, реализующую сходный принцип, предлагает немецкая компания Envisiontec. В оборудовании этой фирмы засветка производится при помощи технологии DLP (Digital Light Processing), аналогичной используемым в компьютерных проекционных системах. Разрешение для одного рабочего слоя составляет 1280×1024 dpi. Толщина слоев варьируется от 150 до 50 мкм. На Prefactory можно делать прототипы размером около 19×15×23 см, а скорость печати составляет до 15 мм в час (в высоту). Задания на Prefactory посылаются как на обычный принтер.

Технология *селективного лазерного спекания*, или SLS-технология, основана на принципе послойного формирования трехмерного объекта путем выборочного спекания металлического или неметаллического порошка

под воздействием управляемого процессором лазера. В этой технологии широко используются материалы, вязкость которых при высокой температуре уменьшается, — поликарбонатные пластмассы, поливинилхлорид, нейлон, металлы, керамика, воск и др. [25].

Пластик в рабочем объеме SLS-машины нагревается почти до температуры плавления, а чтобы он не загорелся и не стал окисляться, в рабочую зону подается азот. Затем мощный лазер «рисует» по пластиковому порошку сечение детали, пластик нагревается выше температуры плавления и спекается. Сверху насыпается следующий слой и процедура повторяется (рис. 30). В завершение работы лишний порошок просто стряхивается с готового прототипа.

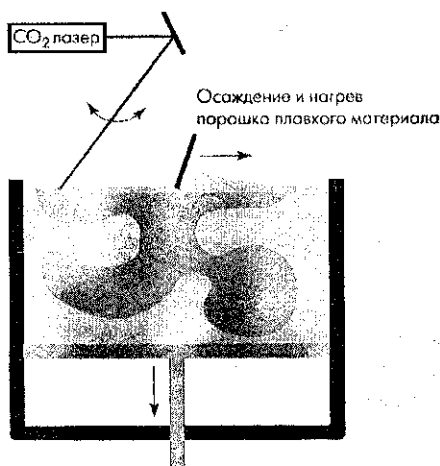


Рис. 30

Интерес представляет процесс получения исходного рабочего материала — порошкообразное сырье получают посредством воздействия на нитевидную заготовку из требуемого материала сверхмощным электромагнитным импульсом длительностью $10^{-6} - 10^{-7}$ с, энергия которого в два — три раза превышает энергию связи атомов разрушаемого вещества. В результате формируется мелкодисперсный порошок со средним размером частиц от 10 мкм до 20 нм. Деформация кристаллической решетки, вызываемая «электровзрывом», образование химических связей молекул металла и нейтральных газов, появление вакансий и атомов внедрения приводят

к возникновению «избыточной» энергии наночастиц. Высокая энергонасыщенность наночастиц обуславливает их высокую активность при спекании, а это, в свою очередь, позволяет существенно снизить температуру синтеза.

Прототипы и изделия, изготовленные с использованием лазерного спекания, характеризуются максимальной прочностью и достаточно высокой точностью. Основные проблемы SLS-технологии [24, 25]:

- пористая поверхность прототипа, возникающая из-за неконтролируемого закрепления на поверхности изготавливаемого прототипа лишних частиц порошка в процессе загустения исходного материала;
- ступенчатая форма, возникающая при послойном формировании;
- необходимость фильтрации токсичных газов, образуемых в процессе;
- низкая производительность (несколько сантиметров в час плюс несколько часов на нагревание и остывание установки).

Вместе с тем, SLS-технология обладает рядом преимуществ:

- лазерное спекание позволяет изготавливать модели с подвижными частями – например, с работающими петлевыми соединениями, нажимающимися кнопками и т.д.;
- для SLS-процесса разработаны специальные материалы, позволяющие напрямую изготавливать металлические детали.

В последнем случае в качестве порошка используются микрочастицы стали, покрытые сверху слоем связующего пластика. Спекание пластика происходит как обычно, а затем деталь обжигается в печи. При этом пластик выгорает, а освободившиеся поры заполняются бронзой. В результате, получается прототип, состоящий на 60 % из стали и остальные 40 % из бронзы. По своим механическим характеристикам он превосходит алюминий и приближается к классической нержавеющей стали. Фактически, SLS уже сейчас позволяет производить полноценные металлические предметы, причем произвольной формы. Кроме того, имеется аналогичный материал с керамической или стеклянной сердцевиной – из него можно делать модели, устойчивые к высоким температурам и агрессивным химическим веществам [23].

Технология ламинирования, или LOM-технология, заключается в послойном вырезании по заданной программе слоев 3D-модели из супертонких листовых материалов с помощью и последующем склеивании их друг с другом. В лазерной технологии луч лазера вырезает контур сечения в верхнем слое, а затем разрезает области излишнего материала для последующего удаления. Новый слой соединяется с предыдущим за счет про-

катки термоваликом и создается новое поперечное сечение, которое затем также вырезается (рис. 31). После того, как все слои будут изготовлены, избыточный материал удаляется вручную. После этого поверхность детали шлифуется, полируется или окрашивается. Существуют и фрезерные LOM-технологии [23, 25].

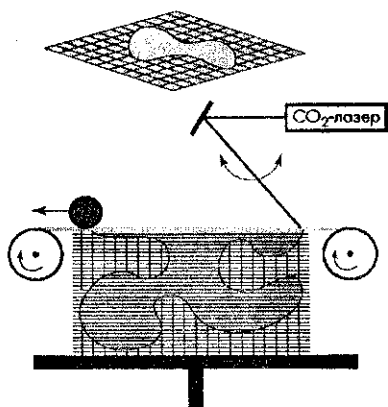


Рис. 31

Преимущества LOM-технологии [23]:

- высокая разрешающая способность – на сегодняшний день может достигать 50 мкм. По мере уменьшения толщины листовых материалов и совершенствования механизмов прецизионного позиционирования резца этот показатель может быть доведен до 10 мкм. Получить такое разрешение с помощью других технологий быстрого прототипирования невозможно из-за трудностей формирования лазерного пучка, жидкостной или порошковой струи малого диаметра, а также жидкого либо порошкового слоя малой толщины;

- при LOM-синтезе применяются разнообразные нетоксичные материалы (металлы, пластмасса, керамика) более чем 60-ти цветов и оттенков;
- материалы и оборудование имеют наиболее приемлемые цены.

Сплавляющее экструдерное осаждение, или FDM-технология, предусматривает протягивание обжимными роликами через экструдер диаметром менее 0,18 мм нити из пластика, поликарбоната, эластомера или другого материала. Нить при этом нагревается, переходит в полужидкое состояние и наносится на матрицу формируемого трехмерного объекта.

Компоновочное вещество, осаждаясь на матрице объекта, затвердевает при температуре окружающей среды. Процессор FDM-системы управляет перемещением головки экструдера по трем осям и регулирует температуру нагрева подаваемого материала. При необходимости автоматически генерируются опорные элементы (поддержка) для нависающих фрагментов модели (рис. 32).

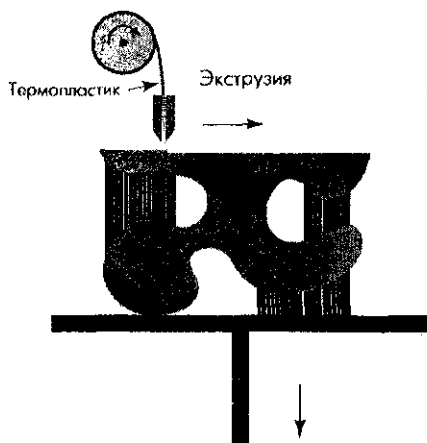


Рис. 32

Особенность FDM-системы – прецизионный нагрев материала до температуры, лишь незначительно превышающей температуру его затвердевания. Во многих FDM-устройствах используются несколько бобин с различными по цвету или составу нитями, причем сменой бобин также управляет процессор. Время смены не превышает 1 мин. Достоинство FDM-систем – безотходная работа, не требующая фильтрации токсичных газообразных продуктов.

Точность техпроцесса FDM составляет 0,12 мм (минимальная толщина слоя), а максимальные размеры прототипа – до 60х60х50 см. Готовые прототипы отличаются прочностью и термостабильностью, не деформируются, не дают усадку и не впитывают влагу. Из них можно собирать функциональные модели, способные выдерживать реальные нагрузки.

Основным производителем оборудования для FDM является компания Stratasys. На сегодняшний день ее лидерские позиции обеспечиваются следующими дополнительными преимуществами оборудования:

– используемые материалы обеспечивают прочность при нагреве свыше 100 °С, устойчивы к воздействию антифризов, моторных масел, бензина и кислот;

– технология водорастворимой поддержки WaterWorks™, применяется только компанией Stratasys, и реализована практически во всех производимых ею установках.

После завершения процесса изготовления элементы водорастворимой поддержки вымываются специальным водным раствором в ультразвуковой ванне. Прототипы, изготовленные с применением этой технологии, остаются гладкими, без рисок и царапин, с сохранением мельчайших деталей. Технология WaterWorks™ предоставляет практически неограниченные возможности моделирования тонкостенных деталей и деталей со сложными внутренними полостями. Прототипы, созданные на оборудовании Stratasys с использованием технологии WaterWorks™, показаны на рис. 33.

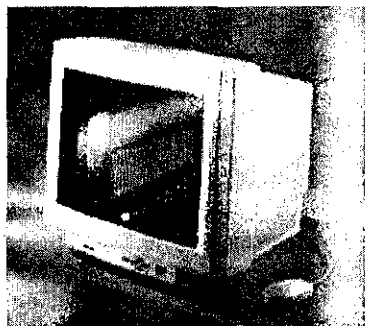


Рис. 33

Технологии трехмерной струйной печати реализуются с использованием различных материалов и технологических процессов, но все варианты реализации объединяет использование струйной печатающей головки.

Американская фирма BPM Technology продвигает на рынке систем быстрого прототипирования *ВМР-технология* (Ballistic Particle Manufacturing – баллистическое осаждение частиц) и оборудование. ВМР-технология реализуется путем перемещения пьезоэлектрической головки, выбрасывающей на поверхность синтезируемой модели мельчайшие капли

расплавленного нетоксичного термопласта (рис. 34). Для получения гладкой поверхности иногда применяется вторая, нагревающая головка. При синтезе объекта с выступающими формами используется специальный связующий материал, который поддерживает их на стадиях формирования объекта, а затем удаляется с помощью растворителя. Достоинства ВРМ-технологии – дешевизна, малые габариты оборудования, относительно низкое энергопотребление, отсутствие системы вентиляции. Недостаток – низкая производительность и единственная фирма-производитель [25].

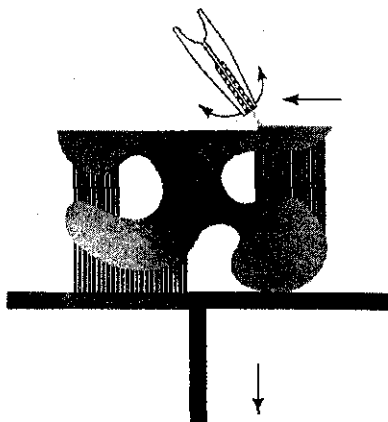


Рис. 34

Другая технология струйной печати – это разработка компании Objet Geometries (Израиль) под названием *Polyjet*. Струйная головка используется для печати фотополимерным пластиком. Модель, как обычно, печатается слой за слоем, причем разрешение в слое составляет 600x300 dpi, а толщина слоя может быть доведена до 16 мкм. Каждый отпечатанный слой полимеризуется в твердый пластик под действием ультрафиолетовой лампы. Технология близка к стереолитографии и превосходит ее по скорости, точности и компактности оборудования. Показательным является тот факт, что аналогичную систему под названием *InVision* производит и компания 3D Systems – первый разработчик стереолитографических систем быстрого прототипирования [24, 25].

Еще одна оригинальная технология струйной трехмерной печати с использованием порошковых материалов была разработана в Массачусетском Технологическом Институте и реализована в установках быстрого прототипирования компании Z Corporation. Установки работают с неток-

сичными порошковыми материалами на основе крахмала или гипса и водным связующим веществом. Узел печати один за другим наращивает слой порошка. Четыре 300-струйные головки (всего 1200 форсунок) наносят связующее вещество, склеивающее частицы порошка в соответствии с формой слоя (рис. 35). Толщина слоя может составлять 76 – 254 нм в зависимости от выбранного соотношения между разрешением (ступенчатостью) и скоростью печати.

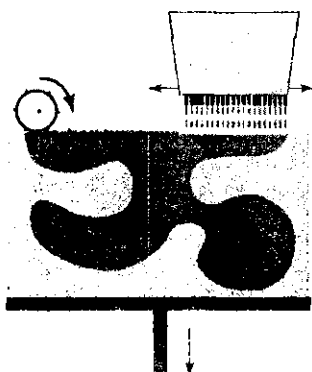


Рис. 35

Особые преимущества технологии струйно-порошковой печати:

- установки могут использовать клеящую жидкость с добавлением пигментных красителей для создания цветных моделей;
- установки пригодны для создания геометрических форм любой сложности без поддерживающих структур, поскольку все нависающие элементы фиксируются несвязанным порошком.

Прототипы, полученные с использованием этой технологии, не отличаются прочностью, но для повышения прочности и улучшения внешнего вида прототип может быть пропитан различными материалами, например, нетоксичным парафиновым воском, эпоксидными смолами, полиуретанами, клеевыми составами. Его можно сверлить и шлифовать [23 – 25]. Пример прототипа, полученного на оборудовании быстрого прототипирования Z Corporation, приведен на рис. 36.

Наряду с неоспоримыми преимуществами у современных технологий быстрого прототипирования имеется и ряд недостатков. Во-первых, в некоторых из них используются дорогостоящие и не всегда безопасные лазеры, химические процессы, расходные материалы. Во-вторых, из-за по-

слойного построения прототипа по окончании работы в большинстве технологий неизбежны трудоемкие операции по отделению материала поддержки от тела прототипа или удалению избыточного материала из закрытых полостей [23].

Тем не менее, технологии и оборудование быстрого прототипирования в последнее время развиваются чрезвычайно активно, что позволяет аналитикам делать довольно оптимистичные



Рис. 36

прогнозы их применения по трем основным секторам рынка [22]: система производственного проектирования, рознично-офисный сектор и сектор так называемых персональных фабрик.

Основную нишу первого сектора занимают дорогие (стоимостью более 100 тыс. долл.) установки, доступные лишь крупным корпорациям и сервисным организациям. Вторичная ниша первого сектора представлена более дешевыми системами (10 – 100 тыс. долл.), используемые в технических и проектных отделениях фирм в качестве 3D принтеров для отработки дизайна и моделирования изделий. В следующем, рознично-офисном, секторе представлены системы единичного производства или производства малыми партиями потребительских товаров [25]. В анализе третьего сектора вполне оправдана аналогия с системами на ПЛИС, совершившими настоящую революцию в электронике. Технология ПЛИС позволяет создавать описание электронной схемы на компьютере, а затем реализовывать результат моделирования в стандартной микросхеме. Сегодня, при желании, можно изготовить микропроцессор или микроконтроллер практически в домашних условиях. Оборудование быстрого прототипирования позволит, в перспективе, сделать то же самое с производством РЭС. Так, например, группа ученых из Калифорнийского университета в Беркли разрабатывает технологию трехмерной печати, которая позволила бы одновременно создавать и корпусные решения, и электронную «начинку» [24].

Таким образом, можно утверждать, что на сегодняшний момент быстрое прототипирование стало важнейшим этапом CAD/CAE/CAM-проектирования, позволяющим значительно сократить сроки изготовления моделей для визуализации, подгонки, изготовления оснастки и других применений, что обеспечивает:

- сокращение времени разработки и модификаций проекта;
- улучшение дизайна;
- повышение качества, уменьшение цены продукта и производства.

Пока установки быстрого прототипирования для отечественных проектных организаций достаточно дороги, поэтому чаще на этом этапе привлекаются фирмы-субподрядчики, специализирующихся на услугах по прототипированию. Характеристика основных направлений практического применения результатов быстрого прототипирования приведена в табл. 1.

Таблица 1

Направление применения	Характеристика направления
Визуализация	Быстрое прототипирование предоставляет инженерам и дизайнерам свободу творчества при создании дешевых физических трехмерных моделей. При желании можно провести чистовую обработку поверхности прототипа, чтобы заказчики и персонал имели возможность оценить эстетические, эргономические и прочие свойства продукта
Форма, собираемость и функциональность изделий	Прототипы, построенные по технологиям, обеспечивающим достаточную прочность моделей (LOM, FDM, SL), удобны в прикладных задачах, требующих оценки формы деталей и проверки собираемости изделий
Литье по выжигаемым моделям	Прототипы могут выступать в качестве разовых моделей для точного литья, если они изготовлены из материалов, выгорающих под действием высоких температур (LOM, Z Corporation). Так как такие объекты не расширяются и не трескаются при обжиге, возможно использование традиционных методов литья, при которых модели выгорают при заполнении формы расплавленным металлом
Вакуумное литье пластмасс	Прочность и жесткость прототипов делает их удобными для вакуумного литья тонких пластмассовых компаундов при малых и средних объемах производства. Прочность моделей, полученных по технологиям LOM, SL, FDM, позволяет им выдерживать высокие напряжения
Изготовления пресс-форм	Прототипы, имеющие достаточную прочность, используется для быстрого изготовления пресс-форм для литья по выплавляемым моделям из парафиново-стеариновых составов при малых и средних объемах производства. Для улучшения качества отливок и увеличения ресурса пресс-форм на рабочие поверхности можно нанести металлическое покрытие
Отливка гипсовых форм	Геометрическая стабильность прототипов и свойственная им точность делают возможным их использование для литья гипсовых форм
Пресс-формы из силиконового каучука	Прототипы часто используются при литье из силиконового каучука для получения полиуретановых или эпоксидных отливок

3.3. Топологические методы автоматической трассировки

3.3.1. Сеточные алгоритмы автотрассировки печатных плат

Среди задач конструкторского проектирования РЭС автоматизации в наибольшей степени подлежат:

- *компоновка* – разделение схемы на конструктивно-обособленные узлы и их реализация элементами низшего иерархического уровня;
- *размещение* – определение оптимального пространственного расположения элементов на коммутационном поле с учетом метрических и топологических ограничений;
- *трассировка* – определение геометрии проводных, печатных или пленочных соединений конструктивных элементов.

Перечисленные задачи конструирования – это задачи структурного синтеза, их решение основано на использовании структурных математических моделей. Однако для анализа качества конструкций применение только структурных моделей недостаточно, поскольку они не отражают процессы функционирования изделий. Поэтому для полной оценки результатов конструирования применяют модели и методы функционального проектирования. В этом проявляется интеграция подсистем функционального (САЕ) и конструкторского (САД) проектирования в САПР РЭС [27].

Первые САПР ПП с элементами автоматической трассировки появились в конце 70-х годов, активное развитие программного обеспечения началось с появлением в арсенале проектировщиков персональных компьютеров, и на сегодняшний момент во всех популярных «электронных» САПР (P-CAD, Protel, OrCAD, PCB и проч.) имеются собственные средства автотрассировки печатных плат. Тем не менее, до сих пор ни одна фирма-разработчик САПР не гарантирует полностью автоматическое решение задачи трассировки. Несмотря на очевидный прогресс в технологии автоматической трассировки печатных плат, все САПР ПП требуют ручного выбора стратегии разводки и ручной прокладки ответственных трасс (земля, питание и т.п.), а результат обычно нуждается как минимум в ручной корректировке [28].

В основе многих алгоритмов автотрассировки лежат различные модификации *волнового алгоритма Ли*. На первом этапе реализации алгоритма плата разбивается на прямоугольные площадки конструкторской сеткой – решеткой. Задача проведения трассы сводится к получению цепочки площадок, соединяющих соответствующие выводы компонентов. Для этого в начальной точке трассы (в одном из контактов) генерируется воображаемая волна, которая может распространяться в 4-х направлениях

сетки. Из доступных в данной точке платы направлений (открытых для трассы, т.е. не имеющих преград) выбираются те, которые максимально сокращают расстояние до конечной точки (рис. 37). В результате реализации «волнового» этапа получается семейство трасс. Окончательное устранение неопределенности геометрии трассы осуществляется на втором этапе путем задания весовой функции – критерия качества пути. Аргументами весовой функции, помимо длины пути, могут являться другие численные характеристики трассы – число поворотов, переходов со слоя на слой и т.д.

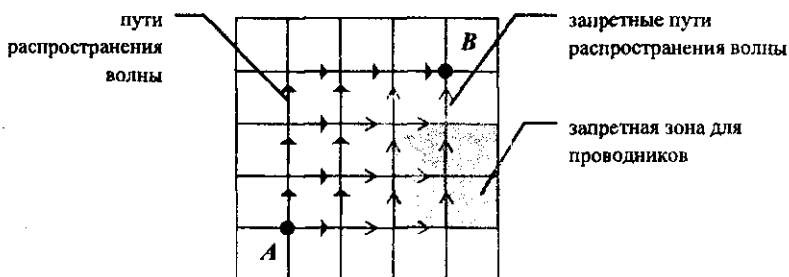


Рис. 37

Существует сетевая модификация волнового алгоритма, в которой множество площадок платы заменяется сетью, клеткам решетки в соответствие ставятся узлы сети, а границам площадок – ребра, соединяющие эти узлы. Цепью является множество точек, состоящее из непересекающихся подмножеств, одно из которых называется источником, а другие – стоком. Цель считается проведенной, если построена трасса, соединяющая одну точку источника только с одной точкой каждого стока. Проведенной цепи ставится в соответствие дерево с ориентированными ребрами, причем ориентация выполняется от источника к стоку. Дерево строится по звеньям, и производится последовательное присоединение очередного стока к построенному фрагменту дерева. Если в результате трассировки всех цепей окажется, что некоторые вершины какой-либо цепи изолированы, т.е. невозможно проведение трассы к уже существующему фрагменту, то эти вершины переносятся на другой слой платы.

Достоинства волновых алгоритмов трассировки:

- позволяют учитывать технологическую специфику печатного монтажа, со всей совокупностью конструктивных ограничений;
- гарантируют построение трассы, если путь для нее существует.

При этом волновые алгоритмы отличаются крайне низким быстродействием, т.к. они сканируют все поле трассировки при проведении каждого отдельного проводника. Из-за этого на этап распространения волны приходится порядка 90 % вычислений, в то время как на этап окончательного определения геометрии трассы только 10 %. Однако при правильной компоновке схемы и размещении элементов значительная часть соединений имеет достаточно простую форму, и для проведения пути нет необходимости сканировать все клетки решетки. В этих случаях для повышения быстродействия используются *лучевые алгоритмы* трассировки. Основная идея лучевого алгоритма состоит в исследовании решетки для определения пути между заданными парами контактов по некоторым заранее заданным направлениям (лучам). Дополнительное преимущество, обеспечиваемое лучевыми алгоритмами – получение так называемых малооборотных путей, т.е. проводников, с геометрией, обладающей наименьшим количеством изломов.

Большее быстродействие (в 75 – 100 раз) при отсутствии гарантии 100 % разводки обеспечивают *алгоритмы канальной трассировки*. На первом этапе таких алгоритмов реализуется предварительное распределение трасс в каналах (рис. 38). Каждый канал характеризуется предельной загрузкой, под которой понимается допустимое число трасс, распределение которых осуществляется с использованием волнового алгоритма.

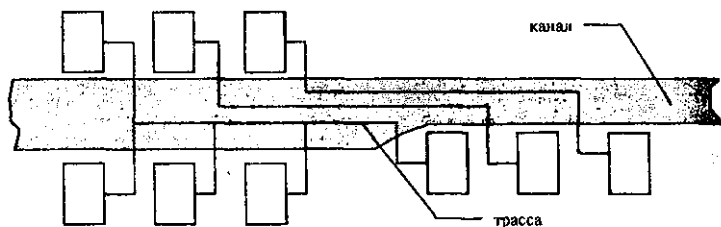


Рис. 38

На втором этапе производится окончательное построение трасс с перекраиваемой топологией внутри каналов по магистралям. Каждая уже проложенная на плате трасса может стать преградой по отношению к новой прокладываемой трассе. По мере нарастания числа проложенных трасс все труднее становится проложить очередную трассу (особенно для насыщенных элементами плат с высокой плотностью размещения). Поэтому наличие возможности смещения ранее проложенных трасс вплоть до пере-

трассировки для прокладки новой трассы представляет весьма мощный инструмент для увеличения плотности монтажа.

Некоторую особенность имеют алгоритмы автоматической трассировки, работающие более чем в двух слоях. В этом случае одним из наиболее существенных ограничений является сведение к минимуму длины проводников, идущих параллельно в разных слоях. Наличие таких участков приводит к паразитным наводкам и препятствует повышению быстродействия схемы. Кроме того, технологически трудно осуществить переход из слоя в слой в любой точке платы. В этом случае автотрассировка начинается с проведения трасс кратчайших соединений с переходом затем к более длинным связям, что позволяет значительно повысить плотность монтажа.

Общая черта рассмотренных алгоритмов – наличие координатной сетки, разбивающей поле построения трассы на большое количество прямоугольных микродискрет, поэтому автотрассировщики, реализующие эти алгоритмы, называют сеточными (Grid-Based) технологиями [27 – 29].

3.3.2. Бессеточная и топологическая автотрассировка печатных плат

В 2002 г. компания Altium анонсировала выход нового автотрассировщика Situs. В анонсе особо отмечалось, что предлагаемый программный продукт реализует принципиально отличный от традиционных сеточных алгоритмов метод «топологической» трассировки [33].

Однако для того, чтобы метод можно было назвать строго «топологическим», он по определению не должен оперировать метрическими параметрами (длина, ширина проводника, расстояние между проводниками и т.д.), а задавать только взаимное расположение проводников друг относительно друга и направление обхода препятствий. При таком подходе элемент представляется множеством контактов, между которыми запрещено проведение соединений, а синтез топологии сводится к выбору такой укладки проводников относительно элементов, которая минимизирует количество пересечений проводников или требуемое число слоёв коммутации. Пример трех вариантов топологической плоской укладки соединений двух элементов в соответствии с нумерацией соединяемых выводов показан на рис. 39.

Чисто топологические методы чрезвычайно быстродействующие, и, в отличие от традиционных сеточных алгоритмов, гарантируют не только разводку 100 % соединений, но и точную оптимизацию разводки по заданным критериям качества. Тем не менее, современное оборудование автоматизации производства ПП не может работать с топологическим описанием схемы. Для получения платы на фотопостроитель необходимо пере-

дать геометрическое описание всех проводников и контактных площадок. Переход от чисто топологического к геометрическому представлению топологии называется задачей *метризации* и представляет большую трудность. Печатная плата имеет заранее заданную форму, на ней могут присутствовать элементы с фиксированным расположением: разьёмы, технологические отверстия, зоны запрета трассировки. Поэтому может оказаться, что найденное топологическое решение не имеет допустимого отображения на заданный конструктив. Кроме того, современные технологии позволяют проводить дорожки между контактами элементов РЭА или под планарными контактами в другом слое. Отсутствие учёта такой возможности топологическим трассировщиком будет приводить к неоптимальным решениям из-за того, что чисто топологическая модель коммутационного пространства неадекватно отражает свойства реального конструктива.

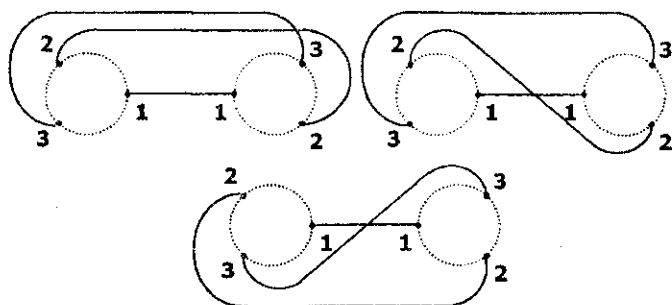
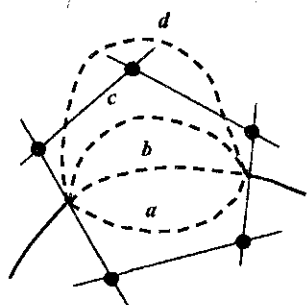


Рис. 39

Вышеуказанные проблемы привели к тому, что на практике чисто топологические методы применения до сих пор не получили. Тем не менее, разработчиками предпринимаются попытки использовать преимущества топологических методов на первом этапе автотрассировки с последующим снижением неопределенности положения трасс. При реализации такого поэтапного подхода рабочее коммутационное поле разбивается на выпуклые многоугольные области (например, триангуляцией), в углах которых находятся контакты. Треугольные макродискреты используются чаще многоугольных, поскольку в рамках топологической модели позволяют контролировать большее число метрических ограничений. Триангуляция – разбиение плоскости на треугольники – является наилучшим разбиением с точки зрения максимизации числа ребер. На этапе топологиче-

ской трассировки положение трасс не фиксируется жёстко, трассы назначаются в многоугольные области – *макродискреты*, в пределах которых их местоположение не конкретизировано, а определено только относительное расположение, т.е. пути проводников фиксируются лишь с точностью до топологической эквивалентности, без учета метрических характеристик (длины, ширины проводника и т.п.).

Два пути называются *топологически эквивалентными*, если один из них можно перевести в другой с помощью непрерывной деформации, не пересекая при этом вершин и сторон разбиения (рис. 40). Полностью неопределённость положения трасс устраняется на этапе геометрической трассировки.



a, b, c – топологически эквивалентные пути проводника;
d – топологически не эквивалентный им путь

Рис. 40

Такой метод – *метод гибкой двухэтапной трассировки* – позволяет преодолеть следующие недостатки традиционных сеточных алгоритмов трассировки на дискретном рабочем поле:

1. *Сеточность*. Каждый элемент топологии (контакт или проводник) в традиционных алгоритмах представляется набором прямоугольных дискретов, поэтому уменьшение шага сетки ведёт к квадратичному увеличению числа её узлов, что означает соответственное уменьшение быстродействия. Из-за сеточности неэкономно используются ресурсы коммутационного пространства: если какая-либо деталь топологического элемента занимает лишь часть площади дискрета, то всё равно оккупируется весь дискрет (рис. 41, *a*). В отличие от сеточных алгоритмов, в методе гибкой трассировки количество дискретов зависит не от размеров рабочего поля, а лишь от числа контактов, что обеспечивает высокую скорость трассировки, малые требования к памяти и более экономичный вариант разводки (рис. 41, *б*).

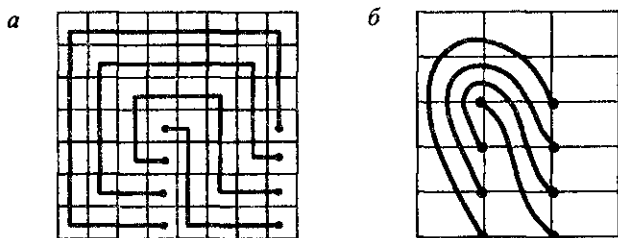


Рис. 41

2. *Ортогональность разводки.* На современных печатных платах, разведенных с использованием сеточных трассировщиков, проводники часто идут не по кратчайшему пути, огибая препятствие, а совершают резкие повороты под 90 или 45 градусов или имеют форму ломаной линии там, где можно пройти по прямой. Гибкая трассировка изотропна, т.е. не имеет никаких выделенных направлений и не подвержена «болезни ортогональности», проводники идут так, как им ближе.

3. *Негибкость.* В сеточных трассировщиках прокладка проводников осуществляется последовательно, при этом никак не учитываются потребности еще не проложенных трасс. После прокладки форма проводника фиксируется, и при поиске путей для следующих трасс нет возможности автоматически изменить форму уже проложенных, отодвинуть фрагмент, перенести в другой слой и т.д. Из-за этого возникают области блокировки контактов (особенно планарных) даже при наличии свободных ресурсов площади. Модель гибкой трассировки, напротив, не приводит к образованию большого количества препятствий метрического характера, имеющих искусственное происхождение. Когда некоторая трасса пересекает ребро макродискрета, фиксируется лишь сам факт пересечения, но не точные координаты трассы. Поэтому, если на ребре ещё осталось место, последующие трассы имеют возможность пересечь это же ребро справа или слева от данной трассы [30, 31].

4. *Формообразующие ограничения.* В большинстве сеточных автотрассировщиков для повышения быстродействия волновых алгоритмов используется прием задания преимущественных направлений (каналов, лучей) для трассировки проводников. Это приводит к появлению большого количества протяженных параллельных участков проводников, и, как следствие, — к возникновению паразитных емкостных связей между ними. Наличие углов в топологии проводников увеличивает риск отслоения их от основы из-за тепловых напряжений, и, кроме того, углы в проводниках —

дополнительные источники отражений сигналов на высоких частотах. Гибкая трассировка обеспечивает разводку проводников в произвольных направлениях и сглаживает вершины углов проводников [32].

Вместе с тем, следует отметить и ряд недостатков гибкой трассировки, не позволяющие на сегодняшний день в полной мере использовать ее достоинства в САПР ПП. В методе гибкой трассировки сложно учитывать метрические ограничения. Триангуляция эффективна, если все элементы топологии (вершины триангуляции) круглые, но затрудняет учет протяжённых элементов (планарных контактных площадок, границ платы и т. п.). Большинство разработчиков выходят из положения, разбивая длинные элементы дополнительными точками на более мелкие, что приводит к снижению эффективности, а гарантии соблюдения всех метрических ограничений не даёт. Вторая проблема – наличие элементов топологии, которые присутствуют на подмножестве имеющихся коммутационных слоёв. Если такие элементы считать сквозными, то неэкономно используются ресурсы коммутационного пространства, а если не считать их сквозными, то на разных слоях получаются разные триангуляции, и тогда возникают трудности с реализацией переходов трассы со слоя на слой. Но основной проблемой остается реализация второго этапа гибкой трассировки – устранение неопределённости геометрического положения трасс, т.е. обеспечение автоматического решения задачи метризации.

Среди программных продуктов комплексной интеграции проектирования РЭС от ведущих фирм-разработчиков «электронных» САПР, решающих проблемы традиционных сеточных методов, следует отметить автотрассировщики SPECCTRA (разработка Cooper&Chyan Technology, с 1998 г. – Cadence), ELECTRA (от бельгийской компании KONEKT SPRL.) и уже упомянутый Situs (Altium).

Автотрассировщик SPECCTRA использует так называемые бессеточные (Shape-based) технологии трассировки. На рис. 42 приведены примеры бессеточного (рис. 42, а) и сеточного (рис. 42, б) моделирования протяженной контактной площадки печатной платы.

В отличие от предшествующих сеточных аналогов (например, P-CAD PRO Route) SPECCTRA моделирует объекты ПП (контактные площадки, переходные отверстия, фрагменты проводников) в виде совокупности геометрических фигур, которым приписаны определенные электрические, физические характеристики и правила проектирования. Особенности:

- объект моделируется не набором дискрет, а геометрически точно, за счет чего достигается большая плотность монтажа с меньшим числом слоев;

– поддержка сложных правил проектирования. Для каждого объекта определенного слоя ПП, области или класса, можно задать ряд индивидуальных правил;

– оптимизация трассировки. При прокладке трасс SPECCTRA сначала разрешает проводникам пересекаться и прокладывает их с малыми зазорами, а затем производит оптимизацию, перекладывая проводники и увеличивая зазоры, там, где это необходимо. На каждом последующем проходе автотрассировщик пытается уменьшить число конфликтов, разрывая и прокладывая вновь связи (метод Rip-up-and-retry) и проталкивая проводники, раздвигая соседние (метод Push-and-shove).

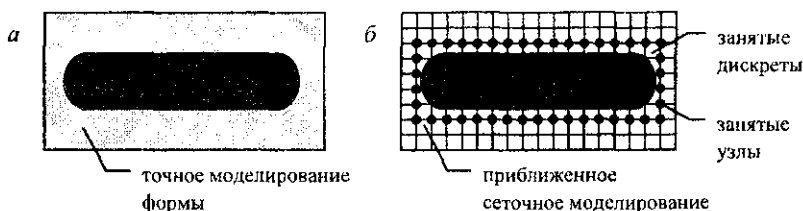
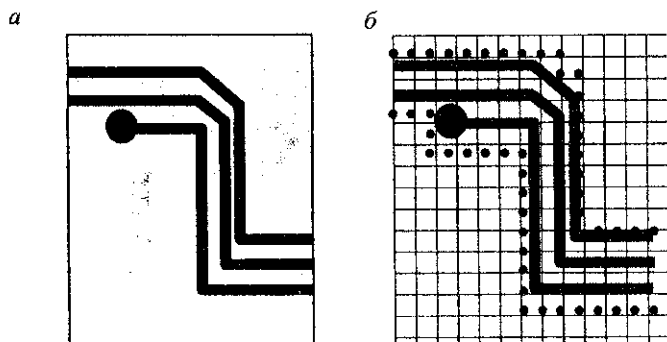


Рис. 42

Последнее выгодно отличает SPECCTRA от традиционных сеточных алгоритмов. Смещение акцента с последовательной бесконфликтной прокладки проводников на стопроцентную разводку с конфликтами, в последствии оптимизирующуюся, перевело Shape-Based алгоритмы из класса последовательных в класс оптимизационных. Необходимо отметить, что в последние годы и сеточные трассировщики (например, MAXROUTE) тоже стали реализовывать разводку с конфликтами, которая затем подвергается итерационному процессу оптимизации. На рис. 43 приведен пример сравнения необходимого числа элементарных геометрических объектов при бессеточном (рис. 43, а) и сеточном (рис. 43, б) моделировании фрагмента ПП.

Из примеров, представленных на рис. 43, видно, что изменение шага координатной сетки не влияет на количество элементарных геометрических фигур бессеточного представления элементов топологии (круглой контактной площадки и прямоугольных участков проводников), а количество задействованных в моделировании дискрет и узлов сетки в сеточном представлении возрастает очень существенно. Эти особенности обеспечивают SPECCTRA значительно более высокое качество автотрассировки, чем у «штатного» сеточного трассировщика P-CAD. Так, при разводке тестовой двухслойной платы, содержащей порядка 2000 планарных выводов и

столько же цепей, P-CAD реализовал 98 % соединений, используя 1200 переходных отверстий. SPECCTRA для этого же проекта обеспечила 100% разводки при реализации всего 800 переходных отверстий с быстродействием, превышающим P-CAD в 20 раз. Убедительные результаты показали и сравнительные тесты на 14-слойной плате для бессеточного автотрасировщика, встроенного в Protel 99 SE и SPECCTRA. Protel 99 SE достиг остатка из 8 неразведенных связей за 3 часа. SPECCTRA завершила трассировку за тридцать минут и оставила две неразведенных связи.



Шаг сетки	Бессеточная технология	Сеточная технология
20 мм	12 геометрических фигур	78 занятых (считая и внутренние) узлов сетки на поле из 195 узлов
1 мм	12 геометрических фигур	31200 занятых узлов сетки на поле из 78000 узлов

Рис. 43

С точки зрения интеграции для SPECCTRA располагает средствами трансляции проектов размещения из PCBoards, P-CAD, PADS, Protel, OrCAD и проектов готовой топологии обратно в перечисленные САПР ПП.

Вместе с тем, SPECCTRA свойственны такие недостатки, как ортогональность прокладки проводников и некоторые формообразующие ограничения: так, например, прямые углы поворота проводников по умолчанию сглаживаются только на 45°, а сглаживание по дуге требует дополнительных ручных настроек [29, 31].

Трассировка фрагмента ПП, выполненная с использованием автотрассировки в SPECCTRA, приведена на рис. 44, а, с использованием автотрассировки

трассировки в Protel-DXP – на рис. 44, б. Оба примера получены в режимах по умолчанию. Следует отметить, что автотрассировщик Protel-DXP предлагает для заданного фрагмента двустороннее решение: в оригинале проводники, располагающиеся на разных сторонах платы, показываются разными цветами – на рис. 44, б это цепи XS1-VT1-VT2, VT1-C1 и R1-R2. То есть, даже для такого простейшего случая SPECCTRA позволяет получить лучший результат автотрассировки.

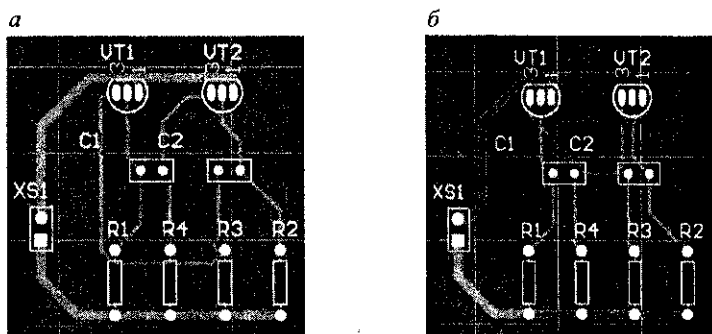


Рис. 44

Трассировщик *ELECTRA* от фирмы KONEKT реализует аналогичные Shape-Based алгоритмы. Первая коммерческая версия программы вышла в октябре 2003 года. При запуске программы из САПР ПП по завершению работы она автоматически возвращает оттрассированный проект в редактор печатных плат. Примечательно, что в программе не предусмотрено никаких команд и приёмов ручной трассировки и коррекции за исключением возможности остановки процесса оптимизации трассировки по результатам визуального наблюдения за возникающими и исчезающими в процессе оптимизации маркерами конфликтов. Примеры различных маркеров конфликтов в *ELECTRA* показаны на рис. 45, а, а результат автотрассировки, полученной в *ELECTRA*, с характерной для Shape-Based методов ортогональностью разводки – на рис. 45, б.

Автотрассировщик *Situs* от компании Altium удовлетворяет критериям топологических методов трассировки по крайней мере по признакам использования разбиения рабочего поля на макродискрету триангуляцией и реализацией трассировки в два этапа – топологической и геометрической разводки. Пример реализации этапа топологической трассировки проводника в *Situs* показан на рис. 46, а, а результат выполнения этапа метризации (конечная геометрия проводника) – на рис. 46, б.

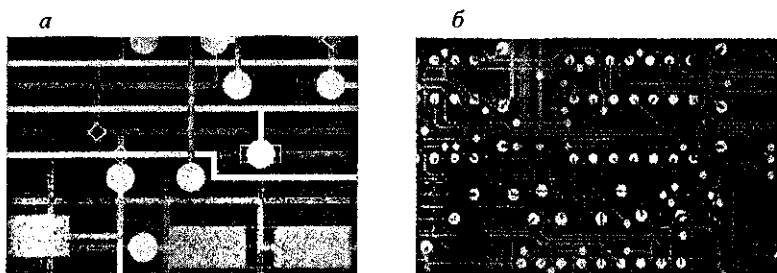


Рис. 45

Как видно из примера, приведенного на рис. 46, б, при решении задачи метризации трассировка становится ортогональной и в дальнейшем привязывается к координатной сетке. Разработчики, по-видимому, отдают себе отчет в том, что преимущества, обеспечиваемые топологическим этапом трассировки, отчасти девальвируются при метризации, и работают над совершенствованием *Situs* в этом направлении. Так, в версии продукта 2004 г. реализована возможность начала и завершения трассировки в точках, находящихся вне узлов координатной сетки. Начиная трассировку от такой контактной площадки первый сегмент геометрического печатного проводника будет двигаться между узлами сетки, что в предыдущих версиях было недопустимо. Такое нововведение значительно упрощает трассировку, особенно в тех случаях, когда расстояния между контактами разных компонентов не кратны друг другу (например, 1,25 мм и 1,27 мм) и выбор «общего» шага сетки затруднителен [30, 33, 34].

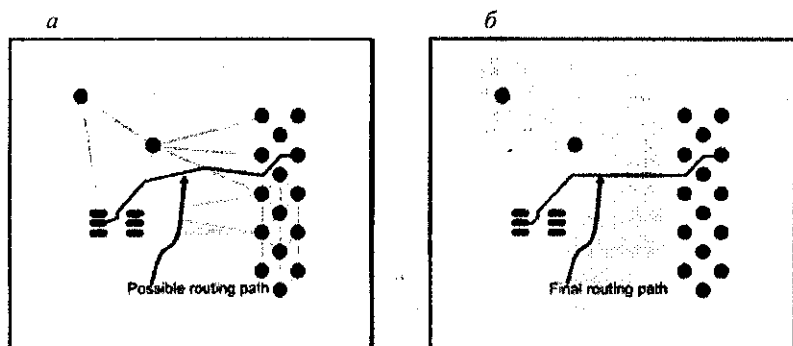


Рис. 46

В наибольшей степени достоинства метода гибкой двухэтапной трассировки использованы в топологическом трассировщике *ToroR (Topological Router)*, созданном группой разработчиков из Санкт-Петербурга (www.freestyleteam.com). Авторским прототипом для трассировщика ToroR явился FreeStyleRoute for DOS (1996 г). В FreeStyleRoute затруднения, связанные с метризацией топологической разводки, были решены за счет использования не только двух отдельных этапов трассировки, но и различных моделей коммутационного пространства для каждого этапа.

На топологическом этапе моделью является триангуляция Делоне, общая для всех трассировочных слоёв, которая позволяет быстро создать качественную трассировку с очень небольшим числом переходов. Триангуляция Делоне разбивает плоскость на наиболее правильные треугольники и её рёбра всегда соединяют любую из вершин разбиения с ближайшей, что очень полезно для практической задачи контроля зазоров.

На этапе геометрической трассировки используется другое разбиение рабочего поля, позволяющее эффективно контролировать зазоры не только между круглыми элементами топологии, но и между вытянутыми, и названное авторами *квазитриангуляцией*. Квазитриангуляция является обобщением триангуляции Делоне и вырождается в последнюю, когда все элементы топологии имеют круглую форму. Квазитриангуляция на каждом слое своя, поэтому этап геометрической коррекции не в состоянии оптимизировать количество переходов, зато реализуется возможность перемещать элементы на уже оттрассированной плате, автоматически сохраняя имеющуюся разводку и соблюдая заданные зазоры [30, 35].

Двухмодельное представление реализовано и в ToroR, который разрабатывался под Windows. Основной особенностью ToroR является автоматическая гибкая топологическая трассировка соединений в произвольных направлениях (не только 90° и 45°). Оптимальная форма проводников вычисляется автоматически. Маршрут каждого проводника имеет кратчайшую длину. При этом гарантируется 100 %-ная разводка цепей. Пример фрагмента ПП с выполненной в системе ToroR автотрассировкой показан на рис. 47. На примере хорошо заметно уменьшение ширины проводника при подходе к контакту и каплевидное сглаживание стыков проводников с контактными площадками, а также огибание контактных площадок по дугам окружностей.

Благодаря перечисленным особенностям система ToroR обеспечивает следующие преимущества:

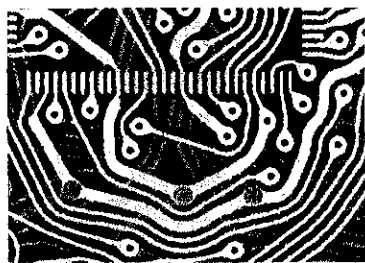


Рис. 47

- сокращение суммарной длины проводников на 40 – 50 %;
- уменьшение числа межслойных переходов в 2 – 3 раза;
- отсутствие углов в топологии проводников;
- возможность уменьшения числа слоев или размеров платы;
- сокращение трудоемкости изготовления в 2 – 5 раз;
- параллельная оптимизация *нескольких* альтернативных вариантов.

Сравнение автотрассировок тестовой ПП, полученных с использованием Shape-based трассировщика и трассировщика TopoR, показаны на рис. 48, а и рис. 48, б соответственно.

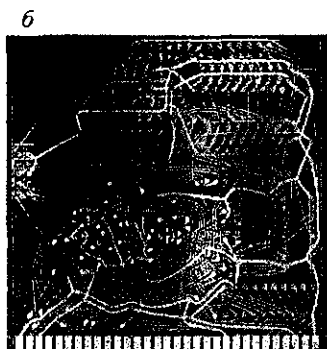
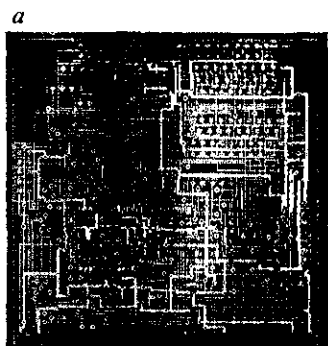


Рис. 48

В табл. 2 приведены характеристики трассировок для четырех тестовых печатных плат, выполненных в различных системах, в сравнении результатами автотрассировки в TopoR при одинаковых проектных нормах.

TopoR разрабатывался как внешний автотрассировщик для САПР ПП PCAD и Protel, но в настоящее время авторы работают над информационной совместимостью TopoR с другими «электронными» САПР. При

этом разработчики пока отказываются от поддержки формата SPECCTRA (DSN), ставшего де-факто стандартом бессеточных трассировщиков, т.к. он не поддерживает произвольного скругления углов [32, 36].

Таблица 2

Плата	Тест 1		Тест 2		Тест 3		Тест 4	
	ТопоR	PCAD	ТопоR	Protel DXP	ТопоR	Specetra	ТопоR	PADS
Цепи	455		548		1095		891	
Компоненты	213		253		1131		571	
Контакты	2065		2588		5708		5050	
Переходы	860	1536	1114	2014	2832	3932	2832	3301
Слои	4	13	2	8	4	4	4	4
Длина, м	36	60	47	48	73	86	73	97

Анализ программных продуктов автотрассировки, использующих бессеточные алгоритмы и топологические методы, позволяет утверждать:

- автотрассировщик следует относить к классу топологических в том случае, если на некотором из этапов трассировки пути проводников фиксируются лишь с точностью до топологической эквивалентности;

- критерии качества топологических методов и методов решения задачи метризации противоречат друг другу. Чем гибче модель топологической трассировки, тем значительно сокращается пространство оптимальных решений, но тем труднее обеспечить соблюдение метрических ограничений на этапе метризации. Метод разрешения противоречия с использованием разных моделей коммутационного пространства на разных этапах трассировки, реализованный в ТопоR, следует признать наиболее успешным;

- в условиях возрастающей плотности монтажа РЭС, и, как следствие, ужесточение критериев и ограничений к электромагнитной совместимости, надежности и технологичности печатного монтажа, перспективы топологических автотрассировщиков выглядят предпочтительнее бессеточных [28 – 36].

4. СИСТЕМНАЯ ИНТЕГРАЦИЯ НА УРОВНЕ ПОДДЕРЖКИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА РЭС

4.1. Полный жизненный цикл продукта и информационная интеграция его поддержки в рамках CALS-концепции

До сих пор мы рассматривали интеграционные решения, методологию и технологии базового уровня интеграции проектирования и производства РЭС. Автоматизация проектирования на этом уровне обеспечивается

CAD/CAE/CAM системами, которые в проектировании РЭС принято называть EDA-системами (Electronic Design Automation). Отличительной чертой современного этапа развития информационных технологий является их применение для обеспечения и поддержки всего жизненного цикла продукции.

Жизненный цикл продукта, как его определяет стандарт ISO 9004-1, это совокупность процессов, выполняемых от момента выявления потребностей общества в определенной продукции до удовлетворения этих потребностей и утилизации продукта. Последовательность этапов жизненного цикла РЭС с характеристикой уровней интеграции и классификацией систем обеспечения интеграции показаны на рис. 49.

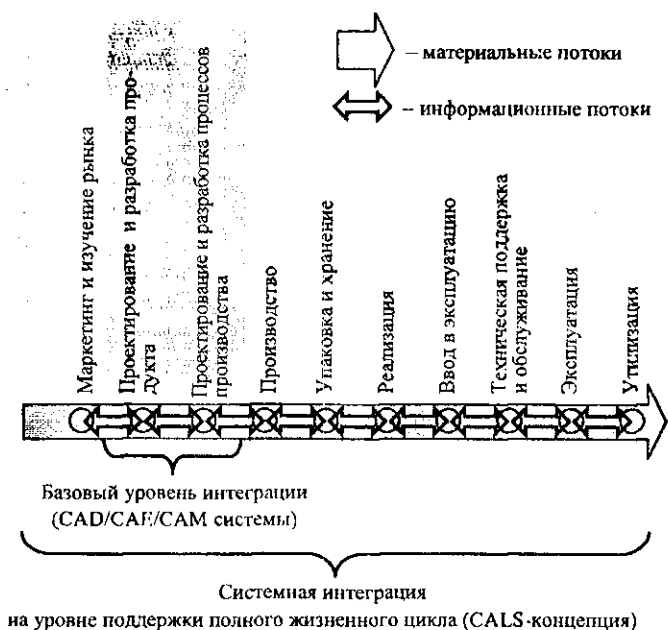


Рис. 49

Информационное взаимодействие субъектов, участвующих в поддержке жизненного цикла, должно осуществляться в едином информационном пространстве. В основе концепции единого информационного пространства лежит использование открытых архитектур, международных стандартов и апробированных коммерческих продуктов обмена данными.

Стандартизации подлежат форматы представления данных, методы доступа к данным и их корректной интерпретации.

Первые шаги в организации единого информационного пространства были предприняты еще в 80-х годах в оборонном комплексе США. Возникла необходимость в обеспечении оперативного обмена данными между заказчиком, производителем и потребителем вооружений и военной техники, а также в повышении управляемости, сокращении бумажного документопотока и связанных с ним затрат. Данная концепция изначально базировалась на понятия жизненного цикла средств вооружений и военной техники и охватывала в основном фазы производства и эксплуатации. На первоначальном этапе инициатива получила обозначение CALS (Computer Aided Logistic Support – компьютерная поддержка поставок). Доказав свою эффективность, концепция CALS начала активно применяться в промышленности, строительстве, транспорте и других отраслях экономики, расширяясь и охватывая все этапы ЖЦ продукта – от маркетинга до утилизации.

Новая концепция сохранила существующую аббревиатуру (CALS), но получила новую, более широкую трактовку: Continuous Acquisition and Life cycle Support – непрерывная информационная поддержка жизненного цикла продукта. Предметом CALS являются технологии использования и информации в процессах, выполняемых в ходе жизненного цикла продукта. В основе CALS лежит комплекс единых информационных моделей, стандартизация способов доступа к информации и ее корректной интерпретации, обеспечение безопасности информации, а также юридические вопросы совместного использования информации (в т.ч. интеллектуальной собственности).

Информационная интеграция базируется на применении следующих интегрированных моделей:

- продукта;
- жизненного цикла и выполняемых в его ходе бизнес-процессов;
- производственной и эксплуатационной среды.

Классификация информационных моделей и их связь со стадиями ЖЦ продукта приведены в табл. 3.

С позиций системного подхода базовые информационные модели – это фундамент, на котором могут быть построены автоматизированные системы управления различного уровня. На основе одной и той же модели жизненного цикла и бизнес-процессов решаются задачи анализа эффективности бизнес-процессов и обеспечения качества продукции. Интегрированная модель продукта обеспечивает обмен конструкторскими данными

ми между проектировщиком и производителем, является источником информации для расчета потребности в материалах, создания справочной и эксплуатационной документации продукта и т.д. [37, 38].

Таблица 3

Стадия жизненного цикла	Информационная модель		
	продукта	ЖЦ продукта и выполняемых в его ходе бизнес-процессов	производственной и эксплуатационной среды
Маркетинг	концептуальная	модель процесса маркетинга продукта	модель маркетинговой среды
Проектирование и разработка продукта	конструкторская	модель процессов проектирования	модель проектно-конструкторской среды
Производство, упаковка, хранение	технологическая	модель процессов производства	модель технологической среды
Реализация	сбытовая	модель процессов продаж	модель среды продаж
Ввод в эксплуатацию, техническая помощь и обслуживание, эксплуатация, утилизация	эксплуатационная	модель процессов эксплуатации	модель эксплуатационной среды

В настоящее время идеологию CALS приняли все развитые страны. Она явилась основой для формирования целого направления в области информационных технологий и оформилась в виде международных стандартов ISO, государственных стандартов и различных нормативных документов. Стандарты определяют правила электронного представления данных об изделиях, среде и процессах, а также правила обмена этими данными.

CALS-стандарты можно подразделить на три группы:

- функциональные стандарты, определяющие процессы и методы формализации;
- информационные стандарты по описанию данных о продуктах, процессах и средах;
- стандарты технического обмена, контролирующие носители информации и процессы обмена данными между передающими и принимающими системами.

Поскольку целью CALS является обеспечение информационной интеграции, важную роль в данной проблематике играет применение международных стандартов (стандартов серии ISO). Характеристика основных стандартов обеспечения CALS-технологий представлена в табл. 4.

Таблица 4

Информационные модели	Стандарт представления информации	Содержание стандарта
Модель ЖЦ продукта и выполняемых в его ходе бизнес-процессов	<p>1</p> <p>2</p> <p>IDEF – Integrated Definition, ISO 10303 AP208</p>	<p>3</p> <p>Функциональное моделирование жизненного цикла и выполняемых бизнес-процессов</p>
Конструкторская	ISO 10303 (STEP)	Структура, конфигурация и геометрия
Производственная	ISO-13584 (PLIB)	Формат данных о библиотеках деталей у поставщиков
	MIL-STD-1388-1/2 Logistic Support Analysis (LSA) Record	Формат данных в процессах материально-технического снабжения
	MIL-M-87268 – Manuals, Interactive Electronic Technical General Content, Style, Format, and User-Interaction Requirements (ETM)	Требования к электронным руководствам: содержание, стиль, формат, интерфейс с пользователем
Модель продукта	MIL-D-87269 – Data Base, Re-visible Interactive Electronic Technical Manuals, for the support of	Требования к оформлению баз данных и электронных справочников по изданиям
Эксплуатационная	ISO 8879 (SGML) – Standard Generalized Markup Language	Способ представления информации в тексто-графических документах
	MIL-PRF-28001C – Markup Requirements and Generic Style Specification for Electronic Printed Output and Exchange of Text	Требования к оформлению электронных документов (рекомендации по применению SGML для оформления электронных документов)

Окончание табл. 4

1	2	3
<p>Модель продукта</p>	<p>ML-PRF-28002C – Requirements for Raster Graphics Representations in Binary Format</p> <p>ML-PRF-28003 – Color Graphics Metafile (CGM)</p> <p>ISO 10744 HyTime – (Hypermedia/Time Based Structuring Language</p>	<p>Требования к представлению растровых изображений в двоичном формате в электронной документации</p> <p>Требования к представлению иллюстраций для технической документации в электронном виде</p> <p>Требования к мультимедийной информации в электронных документах</p>
<p>Модель среды</p>	<p>ISO 15531 (MANDATE)</p>	<p>Форма представления и методы использования информации о производстве и используемых производственных ресурсах, их характеристиках и ограничениях с точки зрения управления производством</p>

Основным стандартом, регламентирующим представление конструкторской и технологической информации о продукте, является ISO 10303 STEP (STandard for the Exchange of Product model data), который определяет «нейтральный» формат представления данных об изделии в виде интегрированной информационной модели. Данные об изделии включают в себя:

- состав и конфигурацию изделия;
- геометрические модели всех необходимых типов;
- административные и специальные данные [37 – 41, 53].

Например, конструкторское электронное описание в соответствии со стандартом STEP содержит структуру и варианты конфигурации изделия, геометрические модели и чертежи, свойства и характеристики составных частей и др. Структура конструкторского описания изделий в соответствии со стандартом STEP представлена на рис. 50.

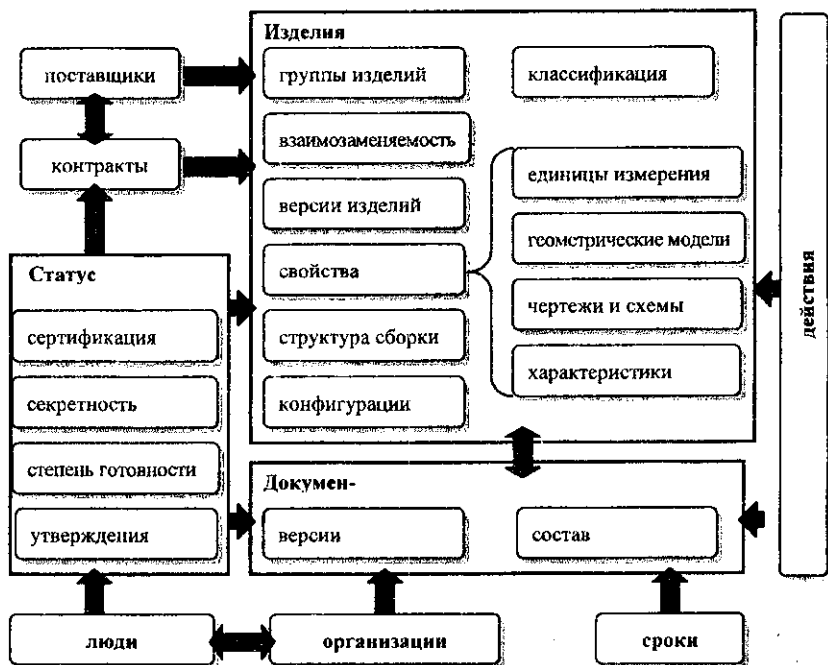


Рис. 50

Продукт, как правило, включает в себя компоненты и комплектующие изделия, получаемые от поставщиков. Одни и те же компоненты и комплектующие одновременно могут входить в разные продукты, поэтому существует потребность в средствах их самостоятельного информационного описания, отдельно от продуктов, в которые комплектующие изделия могут входить. ISO 13584 PLIB (Parts LIBrary) – это серия международных стандартов для представления и обмена доступными для компьютерной интерпретации данными о поставляемых компонентах и комплектующих изделиях (узлах, деталях). В отличие от стандарта ISO 10303 STEP, предназначенного для описания конкретного экземпляра продукта, стандарт PLIB позволяет описывать классы продуктов (компонентов и комплектующих):

- стандартные детали, определенные международными или национальными стандартами (например, крепеж);
- базы данных о деталях конкретного поставщика.

Стандарт ISO 15531 MANDATE (MANufacturing DATa for Exchange) – регламентирует вопросы представления производственных данных. Областью стандартизации является форма представления и методы использования информации о производстве и используемых ресурсах, их характеристиках и ограничениях с точки зрения управления производством [53].

4.2. Технологии поддержки жизненного цикла продукта

Разработка системных решений по обеспечению полной информационной совместимости средств поддержки жизненного цикла на всех его этапах еще до начала проектирования возможно только для инновационных, не имеющих аналогов, проектов на вновь создаваемом предприятии.

Однако с учетом ступенчатого, постепенного развития и внедрения средств автоматизации разработчикам систем поддержки жизненного цикла приходится базировать свои решения на уже используемых подсистемах, т.е. идти по пути поэтапного наращивания интеграционных решений, как правило, на базе ранее выбранных и внедренных на базовом уровне интеграции средств САПР (CAD/CAE/CAM-систем). Поэтапная комплексная автоматизация проектирования, производственных и управленческих процессов не может быть набором «готовых» решений и состоит в первую очередь не в приобретении тех или иных программных средств, а в выработке концепции и выборе технологий ее реализации [49].

В предыдущем разделе были рассмотрены основные принципы предпочтительной концепции интеграции на уровне поддержки всего жизнен-

ного цикла продукта – CALS-концепции, основной на принципе информационного единства всех компонент комплексной автоматизации.

К основным технологиям поддержки жизненного цикла продукта, помимо технологий базового уровня интеграции, относятся:

– PLM-технологии (Product Lifecycle Management) – представляют собой совокупность средств решения задач информационной интеграции в соответствии с CALS-концепцией отдельных, уже внедренных и используемых, подсистем обеспечения жизненного цикла продукта;

– PDM-технологии (Product Data Management) – системы управления технической документацией и проектными данными;

– ERP-технологии (Enterprise Resource Planning) – системы планирования и управления ресурсами предприятий.

PDM и ERP-технологии за счет функции по аккумулярованию и обработке информации составляют ядро любого PLM-решения. При этом в крупных компаниях эти системы могут быть распределенными и функционировать на нескольких программно-аппаратных платформах, поэтому на PLM-решение возлагаются функции обеспечения целостности данных и системной интеграции.

По данным ведущей консалтинговой фирмы CIMdata, Inc. применение PLM-системы дает предприятию следующие преимущества:

- сокращение сроков внесения изменений – на 40 %;
- сокращение сроков подготовки опытных образцов – на 15 – 30 %;
- сокращение времени подготовки производства – на 40 %;
- увеличение производительности в проектировании – на 25 %;
- уменьшение времени разработки изделия – на 75 %;
- уменьшение времени процессов согласования – на 80 %.

Как правило, первой задачей, решаемой при выборе PLM-решения, является интеграция систем PDM с САПР, в т.ч. и на уровне стандартизации. Не менее важен вопрос интеграции между ERP и PDM системами. Такая интеграция дает возможность, с одной стороны, связать данные о составе изделия, общий документооборот и типовые бизнес-процессы компании, с другой – обеспечить доступ к информации о ресурсах предприятия тем сотрудникам, которые не являются непосредственными пользователями ERP. Подобный подход к управлению позволяет организовать единое информационное пространство предприятия на всех уровнях. В этом пространстве можно одновременно осуществлять и проектирование, и подготовку производства, и управление запасами, и учет без дублирования данных [38, 39, 56, 58].

Современные *PDM-системы* состоят из следующих модулей:

- БД объектов изделия, СУБД и средства управления документами (Data Vault и Document Management);
- управления структурой изделия (Product Structure Management);
- управления проектом (Workflow и Process Management);
- интерфейсы к ПП базового уровня интеграции (CAD/CAE/CAM), автоматизированным системам управления производством, коммуникационные интерфейсы, интерфейсы прикладного программирования и т.п.

Как правило, *PDM-системы* используют схему раздельного хранения информации: данные о структуре изделия, свойствах (атрибутах объектов), сведения о правах доступа и другие метаданные хранятся в базе данных, а собственно тела документов (файлы) – в оригинальных форматах на файловых серверах. По этой схеме построено более 90 % представленных на мировом рынке систем. Основные преимущества такого подхода – компактная база, поскольку тела документов хранятся отдельно, а также отсутствие временных затрат и искажения данных при конвертировании форматов данных.

Другая схема хранения информации заключается в помещении и самих тел документов (файлов) в базу данных. При этом для разработчиков упрощается задача реализации механизма защиты документов от несанкционированного доступа, но возникают все те проблемы, которых удастся избежать при хранении документов на выделенных серверах [45]. Выделяют несколько уровней интеграции *PDM* и *ERP-решений* с приложениями:

- возможность хранения в системе документов, созданных в других приложениях, или ссылок на них (минимальный уровень интеграции, поддерживаемый большинством систем);
- обмен данными между полями документа (например, штампом чертежа) и атрибутивной информацией, хранящейся в базе данных системы *PDM* или *ERP* – такая реализация позволяет избежать дублирования и повторного ввода информации пользователем;
- передача информации о параметрах модели в систему *PDM* или *ERP* с синхронизацией данных в автоматическом или ручном режиме;
- корректная работа с компонентными (многофайловыми) документами и с документами, содержащими ссылки на другие документы.

Основным требованием стандартизации применительно к *PDM-решениям* является соответствие действующей нормативной документации (ЕСКД, ЕСТД, ЕСПД и др.), что означает, прежде всего, возможность получения стандартных форм отчетных документов (спецификации, ведомо-

сти и т.п.) и автоматизацию процессов разработки, а также утверждения и изменения изделия и документации на него.

Основными международными стандартами, используемыми в области PDM, являются уже упоминавшийся стандарт ISO10303 (STEP) и стандарты серии ISO 9000 – стандарты обеспечения качества. При этом использование стандарта STEP не исключает использования других средств по обмену данными. Так, в области интеграции прикладных программ с системами PDM в качестве стандарта все чаще используется ODMA (Open Document Management API), а для систем управления проектами (Workflow) роль стандарта де-факто играют рекомендации WfMC (Workflow Management Coalition) [46].

Универсальное PDM-решение *PartY PLUS*, удовлетворяющее требования соответствию национальной нормативной базе, предлагает российская компания «Люция Софт». Система PartY PLUS создавалась как гибкое, переносимое и масштабируемое решение, которое могло бы успешно использоваться на предприятиях и в организациях различного профиля. Практика показала, что такой подход был оправданным: пользователи системы применяют в своей работе различные «механические» САПР (AutoCAD, MicroStation, ProENGINEER, SolidWorks, T-FLEX CAD, КОМПАС и др.), системы автоматизации технологической подготовки производства (Автопроект, ТехноПро) и управления предприятием (BAAN, Navision Ахартa, «Координатор» и др.) на базе различных СУБД (MS SQL Server, Sybase, Oracle). Таким образом, внедрение системы PartY PLUS не вынуждает предприятие привязываться к какой-либо конкретной СУБД, САПР или АСУП. В PartY PLUS реализована поддержка ODMA, что позволило разработчикам решить задачи интеграции с офисными системами: MS Word, Visio, FineReader.

Совместное использование PartY PLUS с системой управления предприятием «Координатор» позволяет построить полнофункциональное PLM-решение, охватывающее весь жизненный цикл: от маркетинговой проработки и разработки документации на изделие до его производства и сбыта [47].

Основное назначение *ERP-систем* состоит в автоматизации организационных процессов предприятия, комплексного и оперативного (в режиме реального времени) планирования и управления ресурсами. В основе любого ERP-решения лежит принцип создания единого хранилища данных (репозитария), содержащего всю деловую информацию, накопленную предприятием в процессе ведения бизнеса, в частности финансовую ин-

формацию; данные, связанные с производством; управлением персоналом; другие данные [54, 58].

До последнего времени в вопросе интеграции САПР с системами ERP, преобладал подход к решению данной задачи, предполагающий, что:

- передача данных о детали, сборочной единице, изделии и технологии их изготовления производится из САПР в ERP, т.е. в одном направлении;

- передача данных осуществляется путем экспорта данных из САПР и импорта данных в ERP в одном из общепринятых форматов, например XML;

- согласование данных в двух системах обеспечивается за счет синхронизации справочников (материалов, подразделений, оборудования и т.д.).

Строго говоря, перечисленные принципы исключают возможность определения такого подхода как «интеграционный», поскольку он не предполагает взаимодействия разработчиков САПР и ERP-систем, и, по сути, возлагает решение проблем интеграции на конечного пользователя. При такой «интеграции» предприятие сталкивается со следующими проблемами:

- не вся информация об изделии и технологии его изготовления формируется в САПР. В условиях постоянной модернизации изделий и изменения технологии, информация, например, о маршрутной технологии, может не только корректироваться, но и формироваться в системе ERP, а следовательно, требуется двусторонний обмен данными об изделии между САПР и ERP;

- синхронизация справочников САПР и ERP возможна только при наличии в системах, а следовательно и в технологических и управленческих службах предприятия, единых структур справочников и правил их ведения.

В большей степени CALS-концепции соответствует альтернативное представление о механизме интеграция, а именно:

- системы САПР и ERP должны использовать одну и ту же СУБД, причем данные, введенные в САПР, должны храниться в таблицах СУБД, доступных системе ERP, а информацию об изменении данных САПР система ERP должна получать автоматически;

- для САПР и ERP необходимы общие справочники;

- информация об изделии и технологии его изготовления может формироваться как в САПР, так и в ERP;

- САПР должна «уметь» формировать технологическую документацию из данных, введенных в ERP (например, маршрутные карты, приказы на изменение норм расхода материалов) [48, 52].

Российские разработчики декларируют именно такой подход к интеграции для систем *ADEM* (система уровня CAD/CAE/CAM) и ERP «*ПАРУС*». Примеры схем взаимодействия *ADEM* и системы «*ПАРУС*»:

- *ADEM* при заполнении углового штампа чертежа детали считывает данные о материале из справочника «*ПАРУС*» и заносит в таблицу «*ПАРУС*» информацию о детали: шифр, наименование, обозначение детали, марку материала и чистый вес детали;

- *ADEM* при формировании спецификации на сборочную единицу или изделие создает и записывает в таблицу «*ПАРУС*» документ «Приказ на изменение спецификации»;

- *ADEM* при создании технологических документов использует справочники «*ПАРУС*»: материалов, оборудования, подразделения и т.д. – и записывает в таблицы «*ПАРУС*» документы «Приказ на изменение норм расхода материалов» и «Приказ на изменение пооперационных норм времени»;

- при изменении технологии изготовления изделия, например, при замене материала или изменении маршрутной технологии, выполненной в службах оперативного управления производством, информация в виде соответствующих документов заносится в систему «*ПАРУС*», а конструкторские и технологические приказы формируются в *ADEM* на основании данных этих документов [48].

4.3. Особенности стандартизации и технологические решения поддержки жизненного цикла РЭС

Как уже отмечалось, одной из основных проблем верхнего уровня интеграции является информационная совместимость уже используемых CAD/CAE/CAM средств с внедряемыми решениями поддержки жизненного цикла. Это связано в т.ч. и с тем, что САПР, в значительной своей части ориентированные на автоматизацию изготовления традиционных бумажных документов, не решают проблемы информационного обмена между различными участниками жизненного цикла изделия (заказчиков, разработчиков, производителей, конечных пользователей и т.д.). Способы представления информации, ориентированные на представление в «твердой» копии, ограничивают возможности использования современных информационных технологий. Так, например, 3D-модель изделия, создаваемая современными САПР, вообще не может быть адекватно представлена на бумаге.

В САПР РЭС также сложилась ситуация, при которой каждый из разработчиков конкретной САПР предлагает собственный формат описа-

ния проектов. При этом нельзя признать удачными и некоторые из предлагаемых обменные форматы, например, PDIF, DXF, IGES и другие, т.к. вскоре после их разработки авторы практически прекратили их поддержку и сопровождение. При этом, как правило, эти форматы содержат описания только конструкции печатной платы при полном отсутствии административных данных, технологических требований, реквизитных данных и т.п. Описание изделия в этих форматах представляется в виде единого файла, при этом форма идентификаторов и информационных единиц проекта мало пригодны для их восприятия человеком, не обладающим специальными техническими навыками.

Одним из доступных решений данной проблемы является разработанный фирмой Valog Computerized Systems Ltd формат обмена данными *ODB++* (версия 6.1), опубликованный в феврале 2002 года. Этот формат на сегодняшний день в наибольшей степени соответствует требованиям CALS-концепции и де-факто претендует на стандартизацию как средство передачи информации о собственно печатной плате, ячейке (плата в сборке) и тестовых данных на производственно-техническом уровне в цепочке проектирования-производства. Особенности формата *ODB++*:

- использует стандартную файловую структуру системы. Преимущество описания изделия в виде дерева подкаталогов в сравнении с использованием одного большого файла проявляется, когда описание проекта должно быть считано с диска или записано на него: универсальная древовидная структура позволяет запоминать или считывать необходимые части проекта а не весь проект целиком. Но при необходимости, когда дерево проекта должно быть передано в другую систему, стандартные программные средства и утилиты компрессии могут быть использованы для преобразования древовидной директории в один плоский файл;

- все файлы в *ODB++* являются читабельными ASCII файлами. Это предоставляет опытному пользователю возможность чтения файлов из базы данных для их понимания и оценки, в то время как применяемые во многих САПР бинарные форматы данных требуют для их просмотра специальных программ [41].

Помимо проблем стандартизации, РЭС как объект применения CALS-идеологии имеет следующие особенности:

- интеграция всех типов моделей в рамках полного жизненного цикла затрудняется их разнородностью и их согласование с учетом граничных условий требует существенных затрат вычислительных ресурсов;

- современные РЭС включают в себя большое количество комплектующих электрорадиоизделий (до десятков и сотен тысяч электрорадиоиз-

делий в одном образце РЭС), характер протекания физических процессов в которых в конечном итоге и определяет функциональные и эксплуатационные свойства проектируемого изделия РЭС.

Один из вариантов учета этих особенностей состоит в унификации математических моделей разнородных физических процессов на основе существующей аналогии протекания [53].

Группа российских авторов разработала основы CALS-методологии проектирования РЭС в соответствии со стандартом ISO 10303 STEP [51]. Для реализации процесса разработки РЭС на основе комплексных исследований характеристик в рамках CALS-технологий предлагается использовать электронный макет РЭС, для которого было выработано следующее определение: *«Электронный макет РЭС (ЭМ) – это единое пространство параметров и переменных модельного ряда, отражающего схемотехническую и конструкторско-технологическую реализацию отдельных частей или РЭС в целом, полученную на основе комплексных исследований характеристик РЭС средствами математического моделирования, осуществляемого, в свою очередь, в рамках информационного взаимодействия разработчиков на любом этапе жизненного цикла РЭС с использованием CALS-идеологии».*

Единое пространство модельных параметров отражается в ЭМ в виде информационного поля, а также моделей схемы, эскиза и монтажных пространств. При этом функциональная иерархия РЭС отображается на соответствующих уровнях конструктивной иерархии и моделях монтажных пространств РЭС. Такие отображения в совокупности с параметрами (содержатся в информационном поле), описывающими модели схемы, конструкции и монтажные пространства, позволяют разработчику наглядно представлять результаты комплексных исследований характеристик РЭС. Модельные ряды схем, конструкций и монтажных пространств могут быть представлены комплектами КД и ТД, объем которых определяется возможностью модельных экспериментов, а также моделью конфигурирования структуры ЭМ. Полученная в конечном итоге модель схемотехнической и/или конструкторско-технологической реализации перемещается по различным этапам жизненного цикла РЭС путем ее конвертации в стандарт STEP, являющийся основополагающим элементом PDM-технологии [51]. Структура электронного макета РЭС с минимальной конфигурацией приведена на рис. 51. Входящая в состав ЭМ модель конфигурирования позволяет в зависимости от особенностей создаваемого РЭС или проектной ситуации настраивать структуру ЭМ РЭС, которая в дальнейшем наполняется в результате проведения ком-

плексных исследований, перемещается по этапам жизненного цикла и преобразуется в интегрированное описание РЭС. «Передвижение» электронного макета по различным этапам жизненного цикла РЭС осуществляется через его двунаправленную конвертацию (обратная схема конвертации используется при проведении дополнительных модельных экспериментов) в БД, имеющей логическую структуру в соответствии со стандартом STEP. Из интегрированного описания составляющие элементы ЭМ (например, «Результаты комплексного исследования характеристик», «Схема структурная и/или принципиальная», «Эскизы конструктивных узлов») могут транслироваться при помощи соответствующих стандартов в интерактивные электронные технические руководства разрабатываемого РЭС [51].

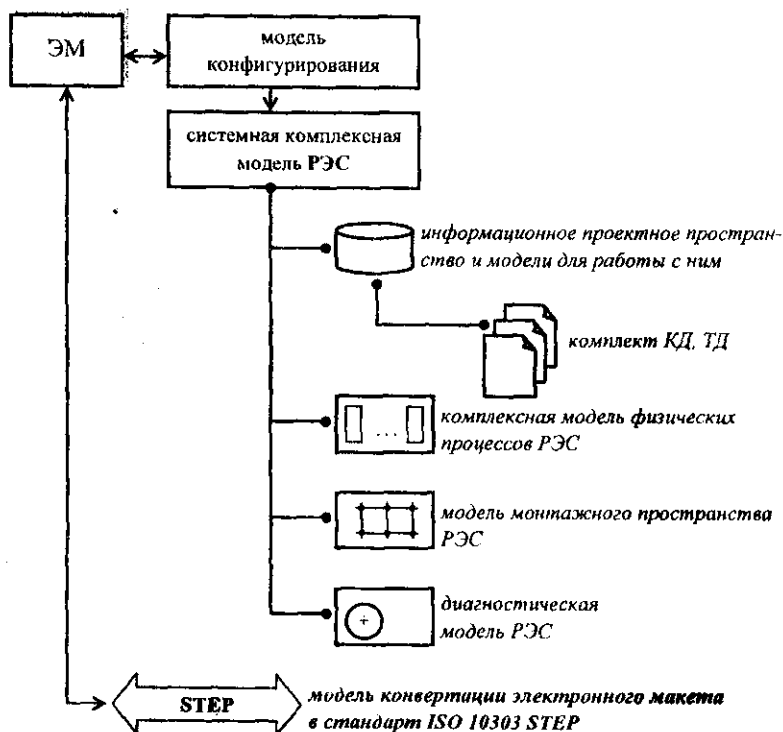


Рис. 51

Российский рынок ПО САПР и систем поддержки жизненного цикла продукта предлагает целый ряд апробированных интеграционных решений для производства РЭС, в той или иной мере удовлетворяющих требованиям CALS-концепции.

Одно из доступных PDM-решений, логично развивающее уже реализованные решения на базовом уровне интеграции между «электронными» и «механическими» САД-системами (см. раздел 3.1.2.), предлагает компания АСКОН (разработчик программного обеспечения САПР под торговой маркой КОМПАС). Компания реализовала собственный прикладной модуль выпуска текстовой КД на изделия электронной техники, разработанной в электронных САПР, причем документация сразу выполняется в форматах системы КОМПАС. Полное название продукта: «*Конвертер текстовой КД P-CAD – КОМПАС*» (далее – Конвертер).

В качестве исходных данных, передаваемых из P-CAD (или других «электронных» САД-систем), используется отчет BOM (Bill of Materials). Для более полной интеграции с чертежом принципиальной электрической схемы или сборочным чертежом печатной платы необходимо предварительно передать эти чертежи из P-CAD в КОМПАС. С помощью графического редактора можно оформить все виды документации (сборочные чертежи печатных плат, схемы электрические принципиальные, перечни элементов, спецификации и проч.) в полном соответствии с ЕСКД. Для этого в КОМПАС-График в поставке уже имеются все необходимые бланки и инструментарий. Конвертер выполнен как стандартное прикладное приложение к графическому редактору КОМПАС-График и запускается непосредственно из среды КОМПАС.

Однако получение текстовых конструкторских документов не является единственной целью – это только первая часть современного PDM-решения. Конвертер разрабатывался как базовая часть комплекса программ КОМПАС для управления инженерными данными *PDM V6*. Данные, полученные с помощью Конвертера, используются этой системой для получения различных отчетов и форм, в т.ч. сводных ведомостей материалов, покупных изделий и прочей документации уровня АСУ производства и ресурсов [42].

Еще одна российская разработка в области PDM-решений позиционируется авторами как «интегрированная система автоматизированного проектирования и комплексного компьютерного моделирования высоконадежной радиоэлектронной аппаратуры в рамках CALS-технологий» [43, 53]. Структура предлагаемого программного комплекса, обеспечивает формирование комплексной электронной модели изделия на базе PDM-

системы и с использованием систем моделирования и проектирования различного назначения, т.е. реализует CALS-концепцию для проектно-производственных этапов жизненного цикла изделия радиоэлектронной аппаратуры. Структура взаимодействия PDM-системы с прочими моделирующими подсистемами приведена на рис. 52.

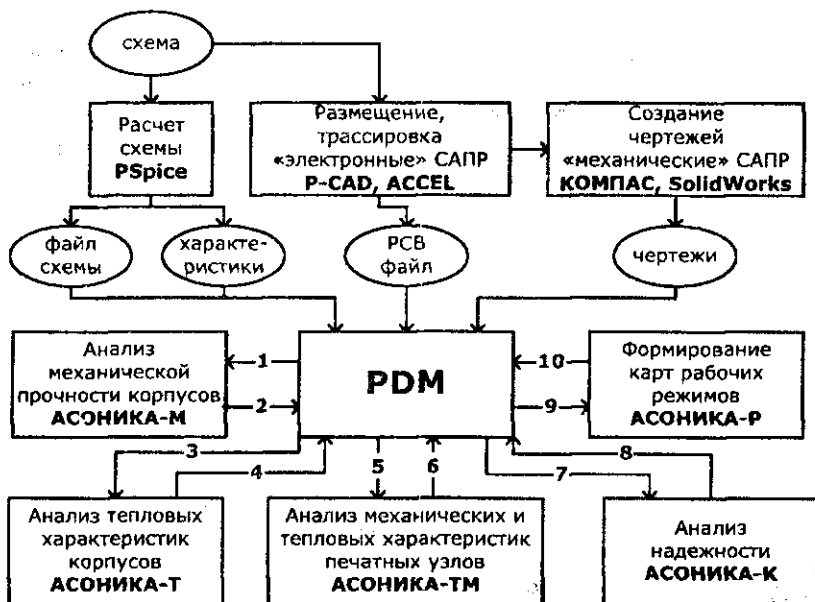


Рис. 52

С помощью специального графического редактора вводится электрическая схема, которая сохраняется в базе данных проектов в PDM-системе и передается в виде файла в систему анализа электрических схем и в систему размещения и трассировки печатных плат. Выходной РСВ-файл САПР ПП сохраняется в PDM-системе, а также передается в «механическую» CAD-систему для создания чертежей. Чертежи также сохраняются в PDM-системе и передаются в подсистему анализа механических процессов в шкафах и блоках РЭА АСОНИКА-М (1 на рис. 52), в подсистему анализа тепловых процессов в шкафах и блоках РЭА АСОНИКА-Т (3 на рис. 52). Полученные в результате моделирования значения напряжений, перемещений, ускорений и температур в конструкциях шкафов и блоков сохра-

няются в PDM-системе (2, 4 на рис. 52). Чертежи печатных узлов (ПУ) и спецификации к ним, РСВ-файлы, температуры воздуха в узлах, полученные в подсистеме АСОНИКА-Т, а также ускорения опор, полученные в подсистеме АСОНИКА-М, передаются из PDM-системы в подсистему анализа тепловых и механических процессов в АСОНИКА-ТМ (5 на рис. 52). Полученные в результате моделирования температуры и ускорения электрорадиоизделий (ЭРИ) сохраняются в PDM-системе (6 на рис. 52). Перечень ЭРИ, файлы с электрическими характеристиками ЭРИ, температурами и ускорениями ЭРИ (7 на рис. 52) передаются из PDM-системы в подсистему анализа показателей надежности РЭА АСОНИКА-К. Полученные в результате показателя надежности РЭА сохраняются в PDM-системе (8 на рис. 52). Перечень ЭРИ, файлы с электрическими характеристиками ЭРИ, температурами и ускорениями ЭРИ (9 на рис. 52) передаются из PDM-системы в подсистему формирования карт рабочих режимов ЭРИ АСОНИКА-Р. Полученные в результате карты рабочих режимов сохраняются в PDM-системе (14 на рис. 52).

PDM-решение в данной разработке построено в соответствии со стандартом ISO 10303 STEP. База данных системы PDM содержит:

- информацию о структуре, вариантах конфигурации изделия и входимости компонентов в различные изделия;
- идентификационную информацию об изделии и его компонентах;
- информацию о технологии изготовления изделий и компонентов;
- электронные образы бумажных документов;
- данные об организационной структуре предприятия, ролях и полномочиях персонала;
- данные о процессе разработки (статусах, присвоенных результатам работы, проведенных изменениях и т.п.).

Кроме того, база данных содержит ассоциированные с элементами изделия документы, а сами элементы имеют набор функциональных или технических характеристик, измеряемых в различных единицах.

Отличительной особенностью PDM является то, что она разработана специально для радиоэлектронной аппаратуры и состыкована системой АСОНИКА, для которой реализованы специальные интерфейсы для ввода типовых конструкций аппаратуры – шкафов, блоков, печатных узлов, что значительно упрощает анализ конструкций РЭА.

Инновационным решением данной разработки являлось обеспечение комплексного решения основных проблем проектирования и производства РЭС, а именно:

1) предотвращение возможных отказов при эксплуатации за счет комплексного моделирования разнородных физических процессов на ранних этапах проектирования;

2) сокращение сроков и затрат на проектирование за счет доступности предлагаемых средств и адекватности результатов моделирования;

3) автоматизация документооборота и создания электронной модели изделия за счет интеграции предлагаемых программных средств в рамках PDM-системы хранения и управления инженерными данными и жизненным циклом изделия (аппаратуры) [43, 53].

PDM-решение для САПР по проектированию навигационной аппаратуры на базе аналоговых, цифровых или комбинированных сверхбольших интегральных схем (СБИС) в виде единой информационной среды – *ЕИС «Разработка-Проектирование-Производство»* – создано группой авторов Российского Института Радионавигации и Времени [19]. Структура этой системы показана на рис. 53.

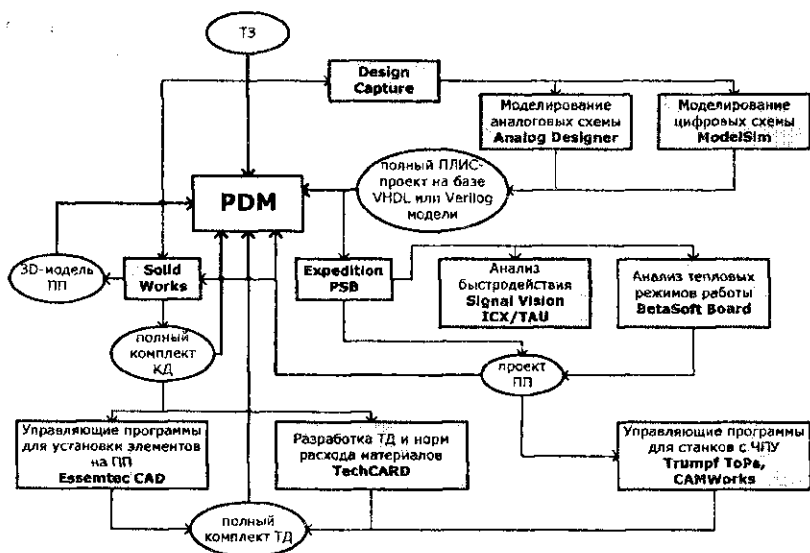


Рис. 53

Проектирование навигационной аппаратуры предполагает не только создание СБИС, но и проектирование печатных плат и корпусов изделий. Результаты схемотехнического проектирования и моделирования (в т.ч. и

СБИС) после процедуры «электронной архивации» в PDM передаются в подсистему проектирования для конструирования электронного модуля на базе печатной платы и конструкции в целом. Разработанная топология ПП моделируется на соответствие исходным требованиям разработчика (задержки прохождения сигналов, паразитные параметры, тепловые режимы, ЭМ-совместимость). Параллельно с этим производится автоматизированная передача двухмерной электронной модели печатной платы из среды проектирования печатных плат (пакет Expedition PCB фирмы Mentor Graphics) в САПР SolidWorks для получения точной трехмерной параметрической модели печатной платы. При помощи САПР SolidWorks также осуществляется разработка корпуса блока. Встроенные программы инженерного анализа дают на этом этапе возможность проверить поведение модели при воздействиях различных механических нагрузок, при деформациях или различных температурных режимах, рассчитать резонансные частоты и т.д. Конструктор осуществляет «электронное макетирование» изделия и формирует комплект чертежей и электронные модели всех составляющих элементов конструкции, проверяет «собираемость» конструкций, осуществляет «электронную» сборку всего изделия, внутриблочный монтаж, моделирование элементов конструкций в движении (замену батарей и пр.). Кроме этого определяются физические свойства изделия: масса, требуемое количество материала для производства деталей, инерционные характеристики и пр.

В отношении процесса технологической подготовки производства следует отметить, что в качестве модуля, позволяющего разрабатывать и модифицировать управляющие программы для станков с числовым программным управлением, была выбрана программа CAMWorks. Поскольку эта программа представляет собой дополнительный модуль к САПР SolidWorks, то передача данных не требует каких-либо дополнительных преобразований. Кроме того, интеграция этих двух программных продуктов делает возможным автоматизировать внесение изменений в управляющие программы в случае изменения трехмерной параметрической модели [19].

В качестве программного обеспечения PDM в системе ЕИС «Разработка-Проектирование-Производство» была использована система Search, на базе которой также была построена система управления документооборотом производства электронных модулей на печатных платах (для САПР P-CAD) [55]. Особенностью рассматриваемой системы является использование однородного программного обеспечения САПР в рамках одного проекта в многопользовательском режиме. Структура управления документооборотом в PDM при проектировании и производстве ПП показана на рис. 54.

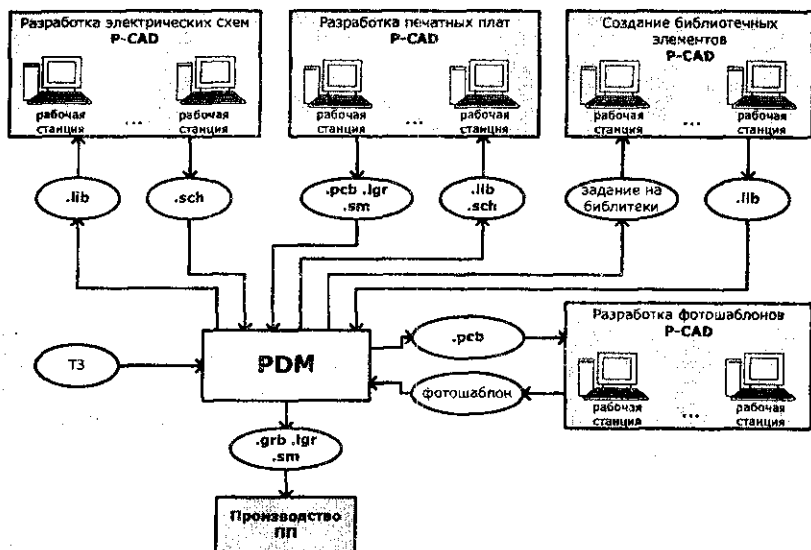


Рис. 54

Определившись с элементной базой, инженер-разработчик схемы электрической принципиальной составляет задание на создание элементов для сквозного проектирования и отправляет его группе ведения библиотек. После получения новых библиотечных компонентов и разработки схемы проект передается на утверждение – в состав PDM-Search входит маршрутизатор сообщений. Составление типовых маршрутов прохождения документов, с помощью которых будет осуществляться документооборот, входит в обязанности администратора.

После утверждения принципиальной электрической схемы составляется задание на разводку печатной платы для инженера-конструктора из группы печатных плат. На основе файла ПП создаются управляющие файлы для сверлильного станка и фотоплоттера, а также сборочный чертеж печатной платы. Предварительную работу с файлом печатной платы можно начать до полного утверждения, т.к. Search обеспечивает копирование файла из архива, не изменяя при этом рабочую версию документа. Инженер-технолог на производстве получает задание на создание управляющего файла. Инженер, ведущий изделие, в состав которого входит данная печатная плата, вводит ее в спецификацию. По спецификации составляются проектные связи изделия. В состав системы входит специальный модуль,

обеспечивающий просмотр и редактирование конструкторских спецификаций [55].

Ведущие производители «электронных» САПР также предпринимают шаги в сторону упрощения интеграции своих решений с системами поддержки жизненного цикла изделий РЭС. Так, например, в качестве дополнительной опции к OrCAD (Cadence) возможно подключение системы *CIS (Component Information System)*. CIS предоставляет разработчикам полные сведения об используемой элементной базе: от технических характеристик до цен. В системе возможен автоматический подбор элементов по заданным характеристикам и создание собственных элементов (при этом автоматически отслеживается информация о них в проекте и пользователь извещается о всех изменениях, связанных с используемыми компонентами).

Система CIS поддерживает любую базу данных совместимую с ODBC-стандартом, что дает возможность использовать информацию о компонентах из любых внешних баз данных, совместимых с этим форматом. Тем самым обеспечивается легкость интеграции с ERP или PDM-системой на уровне производства [44].

Еще одно российское предложение на уровне концепции создания иерархической интегрированной САПР CAD/CAM/CAE/PDM предприятия в едином информационном пространстве корпорации (группы предприятий) с элементами CALS-технологии базируется на ПО T-FLEX (АО «Гоп Системы») и разработано для предприятий по проектированию и изготовлению электромеханических изделий и блоков электроники. Отличительной особенностью этого решения является использование STEP-совместимого ядра твердотельного моделирования и обмена CAD данными Parasolid компании EDS Unigraphics, на котором реализован T-FLEX.

Интегрированная система CAD/CAM/CAE/PDM построена по иерархическому принципу, обеспечивающему взаимодействие программ внутри системы, и, при необходимости, с внешними системами в рамках корпоративного решения по стандартам STEP, IGES, DXF и через прямые трансляторы. Схема интегрированной CAD/CAM/CAE/PDM системы на T-FLEX показана на рис. 55.

Подсистема верхнего уровня T-FLEX DOCs обеспечивает управление данными проекта и контроль над процедурами, используемыми в разработке, изготовлении, послепродажном обслуживании и утилизации изделия, а также гарантирует надежный обмен информацией и данными с корпоративной подсистемой PDM, реализованной с использованием ПО iMAN [50, 57].

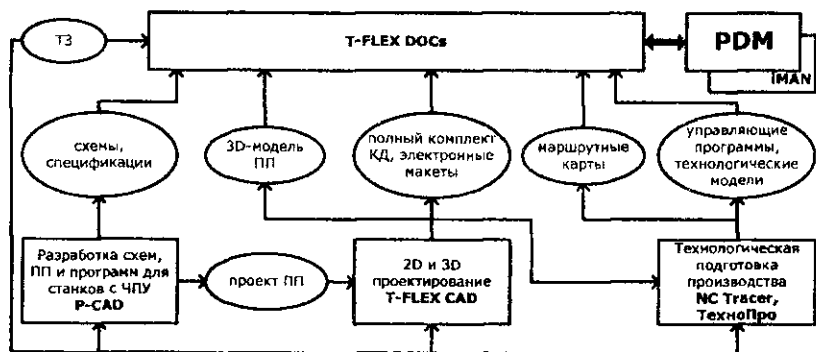


Рис. 55

ЛИТЕРАТУРА

1. Birnbaum, Mark D. Essential Electronic Design Automation (EDA) / Mark D. Birnbaum. – Prentice Hall PTR, 2003. – 256 p.
2. Системы автоматизированного проектирования электронных систем и устройств (обзор) / сост. В.Н. Ланцов [и др.]. – Владимир: ВГУ, 1999. – 137 с.
3. Каншин, М. Обзор программных средств проектирования EDA / М. Каншин, И. Лопанско // EDA Express. – 2000. – № 1. – С. 2 – 18.
4. Резвиг, В.Д. Средства подготовки печатных плат к производству / В.Д. Резвиг // EDA Express. – 2000. – № 1. – С. 28 – 29.
5. Тархов, А.С. Protel+Nexar+Nanoboard=революция в области проектирования ЭУ / А.С. Тархов // EDA Express. – 2004. – № 9. – С. 2 – 6.
6. Мирошник, А.А. Новые возможности P-CAD 4.5-8.7 / А.А. Мирошник // EDA Express. – 2004. – № 9. – С. 14 – 18.
7. Тархов, А.С. Передача проектов ПП из Protel DXP в «механические САПР» / А.С. Тархов // EDA Express. – 2003. – № 8. – С. 27 – 30.
8. Козлов, С.А. Интеграция P-CAD и T-FLEX CAD 9 / С.А. Козлов, Л.И. Махарадзе // EDA Express. – 2005. – № 11. – С. 31 – 32.
9. Потапов, Ю.В. CADSTAR 3D-трехмерная верификация проектов печатных плат / Ю.В. Потапов // EDA Express. – 2006. – № 13. – С. 68 – 72.
10. Гореткина, Е. Какие САПР мы выбираем: 2D или 3D? / Е.Гореткина // PCWeek/RE. – 2007. – № 19. – С. 11 – 15.
11. Елшин, Ю. Трансляция проектов из P-CAD и OrCAD в Altium Designer / Ю. Елшин // EDA Express. – 2007. – № 14. – С. 30 – 36.
12. Потапов, Ю.В. AWR Microwave Office 2006 – курс на интеграцию / Ю.В. Потапов // EDA Express. – 2006. – № 12. – С. 72 – 74.
13. Банков, С.Е. Система 3D электромагнитного моделирования FEKO / А.А. Курушин, С.Е. Банко // EDA Express. – 2003. – № 8. – С. 2 – 6.
14. Курушин, А.А. IE3D идет к разработчикам / А.А. Курушин // EDA Express. – 2007. – № 15. – С. 27 – 28.
15. Папилов, К. Проектирование микрополосковых антенн систем спутниковой навигации / К. Папилов // EDA Express. – 2007. – № 15. – С. 34 – 37.
16. Потапов, Ю. Обзор программных продуктов на рынке EDA-систем / Ю. Потапов // CAD/CAE/CAM Observer – 2001. – № 2 (3). – С. 2 – 7.
17. Потапов, Ю. Тепловое моделирование / Ю. Потапов // EDA Expert. – 2002. – № 10. – С. 12 – 15.
18. Стешенко, В. Программное обеспечение анализа тепловых режимов печатных плат BetaSoft-Board / В. Стешенко // Схемотехника. – 2001. – № 3. – С. 2 – 4.
19. Осинов, О.Д. Единая информационная среда «РАЗРАБОТКА-ПРОЕКТИРОВАНИЕ-ПРОИЗВОДСТВО» систем спутниковой радионавигации / О.Д. Осипов, М.А. Коновалов, В.В. Яриков. – СПб.: Российский институт радионавигации и времени, 2004. – 13 с.
20. Ли, К. Основы САПР (CAD/CAE/CAM) / К. Ли. – СПб.: Питер, 2004. – 560 с.

21. Чейз, Ю. Ускорение электромагнитного моделирования с использованием кластерных вычислительных систем / Ю. Чейз, Б. Раюто // EDA Expert. – 2006. – № 12. – С. 60 – 64.
22. Laser etching for flip-chip debug and inverse stereolithography for MEMS / D. Ehrlich [et. al.] // Solid State Technology/ – 2001. – June. – P. 145 – 150.
23. Котов, С. Прототипирование / С. Котов // Сайт поддержки пользователей САПР [Электронный ресурс]. – 2007. – Режим доступа: <http://www-cad.dp.ua/obzors/prototip.php>. – Дата доступа: 13.12.2007.
24. Афанасьев, К. 3D-принтеры. Copyright (c) 3DNews / К. Афанасьев // Daily Digital Digest, 2004.
25. Слюсар, В. Фабер-технологии. Новое средство трехмерного моделирования / В. Слюсар // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2003. – № 5. – С. 54 – 60.
26. Дин, А. STL-формат для быстрого прототипирования / А. Дин. – Ч. 1: CAD/CAM/CAE Observer. – 2005. – № 5. – С. 64 – 69; Ч. 2: CAD/CAM/CAE Observer. 2005. – № 6. – С. 65 – 69.
27. Основы автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры: учеб.-метод. комплекс для студентов специальности 1-39 02 01 и 1-39 01 01 / сост. и общ. ред. О.Е. Шестопаловой. – Новополоцк: ПГУ, 2004. – 224 с.
28. Стещенко, В. Алгоритмы и программы автоматической трассировки печатных плат / В. Стещенко // Схемотехника. 2002. – № 4. – С. 29 – 34.
29. Резвиг, В.Д. Система сквозного проектирования электронных устройств DesignLab 8.0 / В.Д. Резвиг. – М.: Солон, 2000. – 698 с.
30. Лузгин, С.Ю. Топологическая трассировка: реальность или миф? / С.Ю. Лузгин, О.Б. Полубасов // CHIP NEWS. – 2002. – № 5. – С. 42 – 46.
31. Лузгин, С.Ю. О трудностях сравнения систем трассировки / С.Ю. Лузгин, О.Б. Полубасов // CHIP NEWS. – 2003. – № 10. – С. 56 – 60.
32. Лузгин, С.Ю. Система ToroR – преимущества топологической трассировки / С.Ю. Лузгин, О.Б. Полубасов // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2005. – № 5. – С. 46 – 47.
33. Хигстон, Д. Новый топологический автотрассировщик / Д. Хигстон, Ф. Логхид, Р. Ирвин // CHIP NEWS. – 2002. – № 2. – С. 60 – 64.
34. Тархов, А.С. P-CAD 2004. Новые особенности известного пакета / А.С. Тархов // EDA Express. – 2005. – № 11. – С. 4 – 8.
35. Сухарев, А.В. Модели и процедуры оптимизации в автоматизации проектирования (Программный комплекс FreeStyle Router): учеб. пособие / А.В. Сухарев, А.И. Золотов. – СПб.: СЗТУ, 2001. – 165 с.
36. Лузгин, С.Ю. Возможности трассировщика ToroR / С.Ю. Лузгин, О.Б. Полубасов // CHIP NEWS. – 2006. – № 3. – С. 22 – 27.
37. Судов, Е. Информационная поддержка жизненного цикла продукта / Е. Судов // PCWeek/RE. – 1998. – № 11. – С. 12 – 18.
38. Ширяев, Н. Системная интеграция и PLM: две стороны одной медали / Н. Ширяев // САПР и Графика. – 2006. – № 5. – С. 1 – 3.

39. Кеворков, С. Поддержка жизненного цикла изделия / С. Кеворков // Открытые системы. – 2005. – № 12. – С. 54 – 59.
40. Норенков, И.П. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии / И.П. Норенков. – М.: МГТУ им. Баумана, 2002. – 320 с.
41. Елшин, Ю.М. Электронная промышленность: шаг к CALS-технологиям – стандарт ODB++ / Ю.М. Елшин // EDA Express. – 2003. – № 7. – С. 16 – 24.
42. Теверовский, Л.В. «Механические» САПР делают шаг навстречу «электронным» / Л.В. Теверский // EDA Express. – 2003. – № 7. – С. 12 – 14.
43. Интегрированная система автоматизированного проектирования и комплексного компьютерного моделирования высоконадежной радиоэлектронной аппаратуры в рамках CALS-технологий / А.С. Шалумов [и др.] // EDA Express. – 2005. – № 11. – С. 9 – 15.
44. Тархов, А.С. Последние новости фирмы Cadence / А.С. Тархов // EDA Express. – 2003. – № 8. – С. 31 – 34.
45. Ширяев, Н. Критерии сравнения систем TDM/PDM / Н. Ширяев // САПР и Графика, №1, 2002. – С. 84 – 87.
46. Ширяев Н. Критерии сравнения систем TDM/PDM (окончание). // САПР и Графика. – 2002. – № 2. – С. 80 – 83.
47. Садовников, Д. Интегрированная автоматизированная система TDM/PDM/Workflow PartY PLUS v.3.0 / Д. Садовников // САПР и Графика. – 2002. – № 9. – С. 50 – 51.
48. Ловыгин, В. Интеграция CAD\CAM\CAPP ADEM с ERP-системами и другими программными продуктами / В. Ловыгин, А. Быков, К. Карабчиев // САПР и Графика. 2007. – № 1. – С. 94 – 96.
49. Крючков, А. Вопросы комплексной автоматизации предприятий / А. Крючков, Е. Лазебник // САПР и Графика. – 1997. – № 7. – С. 6 – 12.
50. Егоров, М. Концепция создания иерархической интегрированной САПР предприятия в едином информационном пространстве корпорации / М. Егоров // САПР и Графика. – 2001. – № 11. – С. 28 – 33.
51. Методологические аспекты проектирования РЭС в рамках CALS-инфраструктуры / В.И. Коваленок // Современные проблемы радиоэлектроники: материалы конф., Красноярск, 4 – 5 мая 2001 г. / Красноярск. гос. техн. ун-т; редкол.: Войгу С.Г. [и др.]. – Красноярск, 2001.
52. О'Лири, Д. ERP системы. Современное планирование и управление ресурсами предприятия / Д. О'Лири. – М.: Вершина, 2004. – 272 с.
53. Шалумов, А.С. Введение в CALS-технологии: учеб. пособие / А.С. Шалумов, С.И. Никишкин, В.Н. Носков. – Ковров: КГТА, 2002. – 137 с.
54. Киселев, А.. Процессы и документооборот промышленного предприятия как основа для автоматизации: учеб. пособие для студентов ВУЗов / А. Киселев. – Новосибирск: НГТУ, 2006. – 290 с.
55. Гольшева, А. Система управления документооборотом при производстве электронных модулей / А. Гольшева // EDA Express. – 2002. – № 5. – С. 58 – 61.

56. Воскресенская, Е.А. Опыт внедрения PLM-системы на промышленном предприятии / Е.А. Воскресенская // CAD/CAM/CAE Observer. – 2005. – № 5. – С. 46 – 49.

57. Киселев, А. Информационные технологии АСУ – CRM, SLM, PLM, PDM / А. Киселев. – Новосибирск: НГТУ, 2004. – 77 с.

58. Harwood, S. ERP: The implementation cycle / S. Harwood. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003. – 183 p.

**Перечень публикаций в научной периодике по тематике курса
(рекомендуются для выполнения зачетной работы)**

1. Аведьян, А. Solid Works – Russia: системный подход к системной интеграции / А. Аведьян // САПР и графика. – 2004. – № 5. – С. 23 – 28.

2. Алексеев, Н.А. Универсальная информационная система мониторинга жизненного цикла продукции / Н.А. Алексеев, Е.С. Гаврилов, М.Ю. Слободин // Недра Кузбасса. Инновации: труды V Всерос. науч.-практ. конф., Кемерово, 29 – 31 янв. 2006 г. / Центр новых технологий КемГУ. – Кемерово: ЦНИТ, 2006. – С. 51 – 52.

3. Анিকেев, Г.Е. Обзор технологий интеграции CAD и CAE / Г.Е. Анিকেев, А.Н. Василец // Информационные средства и технологии: труды междунар. науч.-техн. конф., 17 – 19 окт. 2006 г.: в 3 т. – М.: Янус-К, 2006. – Т. 1. – С. 8 – 15.

4. Арончиков, Ф.М. Метод интеграции систем «CAD-CAM-DfF» при проектировании и изготовлении печатных плат / Ф.М. Арончиков, И.И. Токар, Ю.И. Шапин // Информ. технологии в проектировании и пр.-ве. – 2007. – № 3. – С. 30 – 33.

5. Барабанов, В.В. Роль интегрированных информационных систем управления производством в решении проблемы повышения качества и конкурентоспособности продукции промышленных предприятий / В.В. Барабанов // ИТПП. – 2000. – № 4. – С. 3 – 8.

6. Бекишев, А.Т. Развитие CALS-технологий радиоэлектронной промышленности на базе системы АСОНИКА / А.Т. Бекишев // Качество и ИПИ (CALS)-технологии. – 2007. – № 2 (14). – С. 56 – 61.

7. Белов, А.В. Особенности разработки интегрированной информационной среды в CALS-технологиях / А.В. Белов, С.Я. Гродзенский, В.В. Сидорин // Проблемы качества, безопасности и диагностики в условиях информ. о-ва «КБДИнфо-2005»: материалы науч.-практ. конф., Сочи, 1 – 10 окт. 2005 г. / Международная академия информатизации, Академия проблем качества РФ, Академия информатизации образования; редкол.: С.У. Увайсов [и др.]. – М.: МГИЭМ, 2005. – С. 163 – 165.

8. Белов, А.В. Мониторинг качества в системе менеджмента качества на основе CALS-технологий / А.В. Белов, В.В. Сидорин // Молодые ученые – науке, технологиям и проф. образованию в электронике: материалы Междунар. науч.-техн. шк. – конф., Москва, 26 – 30 сент. 2005 г. / МИРЭА. – М.: МИРЭА, 2005. – С. 127 – 129.

9. Беспалов, В. Развитие систем PDM: вчера, сегодня, завтра... / В. Беспалов, В. Клишин, В. Краюшкин // САПР и графика. – 2001. – № 11. – С. 12 – 14.
10. Биряльцев, Е.В. Управление эксплуатацией информационных ресурсов на основе методологии CALS / Е.В. Биряльцев, С.В. Миронов // Инфокоммуникационные технологии глобального информ. о-ва: тезисы докладов 3 ежегод. Междунар. науч.-практ. конф., Казань, 8 – 9 сент. 2005 г. / КГУ; редкол., под ред. Ш.М. Чабдарова [и др.]. – Казань: КГУ, 2005. – С. 43 – 44.
11. Бобров, Л.К. Жизненный цикл проекта создания информационной системы как процесс / Л.К. Бобров // Подготовка и переподготовка специалистов библиотечно-информационной сферы: ежегод. межведом. сб. науч. трудов. – М.: ГПНТБ России, 2005. – С. 65 – 75.
12. Бороздин, Д.Н. Имитационное моделирование сложных производственных систем в среде PDM / Д.Н. Бороздин // ИТПИ. – 2006. – № 1. – С. 10 – 16.
13. Бороздин, Д.Н. Управление данными об изделии в ходе жизненного цикла изделия / Д.Н. Бороздин // Качество и ИПИ (CALS)-технологии. – 2004. – № 1 (1). – С. 63 – 66.
14. Бриндииков, А.Н. Проблемы развития ИПИ-технологий как средства кардинального повышения качества продукции и эффективности производства / А.Н., Бриндииков, В.В. Барабанов // Качество и ИПИ (CALS)-технологии. – 2005. – № 2 (6). – С. 28 – 32.
15. Брук, П. Обзор возможностей PLM-систем / П. Брук, В. Стародубов // САПР и графика. – 2004. – № 8. – С. 70 – 75.
16. Быков, А.В. ADEM. Зачем конструктору интегрированный CAD/CAM ? / А.В. Быков // ИТПИ. – 2005. – № 4. – С. 57 – 60.
17. Васильев, В.А. Интегрированная система управления ресурсами, проектами и качеством продукции / В.А. Васильев, В.И. Галкин, А.В. Цырков // Применение ИПИ (CALS): материалы Междунар. конф.-форума, Москва, 3 – 4 дек. 2003 г. / НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика»; редкол.: Н.П. Алешин (отв. ред.) [и др.]. – М.: ИИ МГТУ «Станкин», Янус-К, 2003. – С. 9 – 10.
18. Васильчиков, С.А. Практическая реализация CALS-идеологии при моделировании тепловых процессов в радиоэлектронной аппаратуре / С.А. Васильчиков, С.Ю. Мельников, А.С. Шалумов // тезисы докладов науч.-техн. конф., Москва, 24 февр. – 3 марта 2005 г. / МИЭМ; редкол.: В.Н. Азаров (общ. ред.) [и др.]. – М.: МИЭМ, 2005. – 136 с.
19. Виртуальное предприятие и CALS-технологии – залог выпуска высококачественной, конкурентоспособной продукции / Г.С. Говоренко [и др.] // Качество и ИПИ (CALS)-технологии. – 2004. – № 1 (1). – С. 79 – 81.
20. Вишнеков, А.В. Методы принятия решений в распределенных CAD / CAM / CAE системах. Методы комплексной оценки вариантов в условиях определенности исходной информации / А.В. Вишнеков, Е.М. Иванова, И.Е. Сафонова // Качество и ИПИ(CALS)-технологии. – 2006. – № 3 (11). – С. 35 – 40.
21. Власов, С.Е. Разработка интегрированной САПР радиоэлектронной аппаратуры с реализацией элементов ИПИ-технологий / С.Е. Власов // Информ.

технологии в развитии Северо-Запада РФ: материалы 3-го бизнес-форума, Санкт-Петербург, 26 – 29 ноября 2002 г. / Ассоциация экономического взаимодействия субъектов Северо-Запада российской Федерации, Администрация Санкт-Петербурга, Выставочное объединение «Рестэк»; редкол.: Н.И. Афанасьев (отв. ред.) [и др.]. – СПб., 2002. – С. 63 – 65.

22. Внедрение CALS-технологий в КБ приборостроительного и ИТ профиля / В.И. Везенов [и др.] // Качество и ИПИ (CALS)-технологии. – 2004. – № 1 (1). – С. 86 – 87.

23. Внедрение CALS-технологий при создании системы управления данными в САПР электроники / Е.И. Качанов [и др.] // Применение ИПИ (CALS)-технологий для повышения качества и конкурентоспособности наукоемкой продукции: материалы Междунар. конф.-форума, Москва, дек. 2003 / НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика»; редкол.: Н.П. Алешин (отв. ред.) [и др.]. – М.: ИЦ МГТУ «Станкин», Янус-К, 2003. – С. 63 – 64.

24. Глинская, Н.Ю. Интеграция систем автоматизированного проектирования на основе стандартов STEP CALS-технологий / Н.Ю. Глинская // Вестн. Курган. гос. ун-та. – 2005. – № 2 (02). Сер. Техн. науки. Вып.1. – С. 161 – 163.

25. Гуцин, О. Внедрение процесса управления программной документацией в ФНПЦ РПКБ на основе PDM-системы PartY LT / О. Гуцин // САПР и графика. – 2003. – № 8. – С. 47 – 51.

26. Гуцин, О. Управление изменениями документов электронного архива ОАО РПКБ в системе Lotsia PDM PLUS / О. Гуцин // САПР и графика. – 2006. – № 4. – С. 60 – 64.

27. Давыдов, А.Н. CALS-технологии информационной интеграции и кооперации / А.Н. Давыдов, В.В. Барабанов, Е.В. Судов // Конверсия в машиностроении. – 1998. – № 6. – С. 50 – 54.

28. Давыдов, А.Н. CALS-технологии: основные направления развития / А.Н. Давыдов, В.В. Барабанов, Е.В. Судов // Стандарты и качество. – 2002. – № 7. – С. 12 – 18.

29. Давыдов, Ю.В. CALS-технологии – основа качества при производстве наукоемких изделий / Ю.В. Давыдов // ИТПП. – 2005. – № 4. – С. 3 – 6.

30. Давыдов, Ю.В. Информационные технологии – основа обновления российской промышленности / Ю.В. Давыдов, В.А. Злыгарев, Л.К. Кончеев // ИТПП. – 1998. – № 1. – С. 3 – 7.

31. Девяткина, М.А. Методы обнаружения ошибок геометрических построений в электронных чертежах / М.А. Девяткина // Вестн. ИжГТУ. – 2006. – № 2 (30). – С. 27 – 29.

32. Денисов, А. Стандарты в области конструкторско-технологического моделирования / А. Денисов // Стандарты и качество. – 2007. – № 7. – С. 54 – 57.

33. Дмитров, В.И. Средства компьютеризированной поддержки STEP-ориентированной CALS-технологии проектирования производственных систем / В.И. Дмитров, А.В. Андриенко // Информ. технол. – 1996. – № 3. – С. 2 – 7.

34. Долгих, Э.А. Инженерная методика автоматизированного проектирования печатных узлов на основе CALS-технологий / Э.А. Долгих, А.В. Сарафа-

нов // *Соврем. проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр.* – Красноярск: КГТУ, 2004. – С. 587 – 589.

35. Евстратов, М.Л. Методические аспекты реализации процессно-ориентированного управления и его автоматизация при помощи программного продукта PDM STEP Suite / М.Л. Евстратов, Д.С. Карасев // *Качество и ИГИ (CALS)-технологии.* – 2004. – № 1 (1). – С. 46 – 48.

36. Журавский, В.Г. Опыт информационной поддержки создания комплексов технических средств АСУ / В.Г. Журавский, В.В. Гольдин // *Качество и ИГИ (CALS)-технологии.* – 2005. – № 4 (8). – С. 6 – 12.

37. Зворыкин, Л.Н. Информационная поддержка жизненного цикла инновационного производства микроселектронной аппаратуры в новых экономических условиях / Л.Н. Зворыкин // *ИТПП.* – 1997. – № 2. – С. 11 – 16.

38. Злыгарев, В.А. Некоторые актуальные вопросы построения и эксплуатации CALS систем / В.А. Злыгарев, В.Н. Юрин // *Конструкторско-технологическая информатика-2005 = Computer science for design & technology: тр. V Междунар. конгр., Москва, 5 – 7 окт. 2005 г. / МГТУ «Станкин»; редкол.: А.А. Кутин (общ. ред.) [и др.]. – М.: «Станкин», Янус-К, 2005. – С. 256 – 260.*

39. Зориктуев, В.Ц. Особенности применения автоматизированного 3D-проектирования изделий в рамках CALS-технологии / В.Ц. Зориктуев, Ю.В. Рябов, В.И. Дерябин // *Актуальные проблемы конструкторско-технологического обесп. машиностр. Пр-ва: материалы Междунар. конф., Волгоград, 16 – 19 сент. 2003 г.: в 2 ч. / ВГТУ; редкол.: Ю.М. Быков (отв. ред.) [и др.]. – Волгоград: ВолГТУ, 2003. – Ч. 1. – С. 9 – 12.*

40. Информационная поддержка жизненного цикла электронных средств: монография / В.В. Гольдин [и др.]. – М.: Радио и связь, 2002. – 379 с.

41. Кандырин, Ю.В. Методы структурирования альтернатив для оптимального выбора компонентов в CALS-технологиях электронной аппаратуры / Ю.В. Кандырин // *Качество и ИГИ (CALS)-технологии.* – 2004. – № 4 (4). – С. 51 – 56.

42. Кандырин, Ю.В. Методы структурирования альтернатив для оптимального выбора компонентов в CALS-технологиях электронной аппаратуры / Ю.В. Кандырин // *Качество и ИГИ (CALS)-технологии.* – 2007. – № 2 (14). – С. 62 – 68.

43. Картышов, К.В. Признаки конструкторской документации для автоматизации процесса документооборота в КБ предприятия радиотехнического профиля / К.В. Картышов, М.Я. Мактас // *Соврем. проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем: тр. 4 Всерос. науч.-практ. конф. (с участием стран СНГ), Ульяновск, 5 – 6 окт. 2004 г. / Мин-во образования и науки РФ, Админ. Ульяновск. обл., Ульяновск. гос. техн. ун-т, ОАО «Ульяновский механический 3-д», Российское НТО РЭС им. А.С. Попова, Ульяновск. регион. отд. РНТО РЭС им. А.С. Попова, Ульяновск. научн. центр «Ноосферные знания и технологии» РАЕН. – Ульяновск: УлГТУ, 2004. – С. 149 – 151.*

44. Кожевников, А.М. Методы CALS-технологии при оптимизации выбора электрических и тепловых режимов электрорадиоизделий / А.М. Кожевников // *ИТПП.* – 2000. – № 3. – С. 23 – 26.

45. Колесов, И.А. Обеспечение оптимизации технологического процесса в рамках CALS-технологий / И.А. Колесов, А.А. Левцкий, С.И. Трегубов // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. / Красноярск. ГТУ. – М.: Радио и связь, 2006. – С. 261 – 263.

46. Коломейцев, С.С. Разработка методики применения подсистемы АСОНИКА-ГМ в CALS-технологиях проектирования РЭС / С.С. Коломейцев, А.Н. Игнатовский // Науч. техн. конф. студентов, аспирантов и мол. специалистов МИЭМ: тез. докл. / МИЭМ; редкол.: В.Н. Азаров (общ. ред.) [и др.]. – М.: МИЭМ, 2003. – С. 198 – 199.

47. Коломейцев, С.С. Концепция формирования виртуального проекта радиоэлектронной аппаратуры с применением системы АСОНИКА / С.С. Коломейцев, Ю.Н. Кофанов // Качество и ИПИ (CALS)-технологии. – 2007. – № 2 (14). – С. 33 – 41.

48. Кофанов, Ю.Н. Развитие CALS-технологий радиоэлектронной промышленности на базе системы АСОНИКА / Ю.Н. Кофанов // Качество и ИПИ (CALS)-технологии. – 2004. – № 4 (4). – С. 45 – 50.

49. Кофанов, Ю.Н. Реализация CALS-технологий для проектирования сложной радиоэлектронной аппаратуры / Ю.Н. Кофанов, Н.В. Малютин, С.С. Коломейцев // Качество и ИПИ (CALS)-технологии. – 2005. – № 4 (8). – С. 50 – 56.

50. Кофанов, Ю.Н. Метод информационной поддержки ранних стадий проектирования радиоэлектронной аппаратуры / Ю.Н. Кофанов, А.В. Сарафанов, В.В. Воловиков // ИТПП. – 2003. – № 3. – С. 51 – 56.

51. Кочегаров, И.И. Информационное взаимодействие этапов жизненного цикла конструкций РЭС / И.И. Кочегаров // Современные охраняемые технологии и средства обеспечения комплексной безопасности объектов: 5 Всерос. науч.-техн. конф., Пенза – Зарсчный, 18 – 20 мая 2004 / НИКИРЭТ. – Пенза: ПГУ, 2004. – С. 270 – 273.

52. Кочегаров, И.И. Межсистемные взаимодействия в сложных информационных структурах создания РЭС / И.И. Кочегаров // Качество и ИПИ (CALS)-технологии. – 2004. – № 4 (4). – С. 20 – 24.

53. Красковский, Д. Обзор состояния рынка систем PLM/TDM/PDM/Workflow / Д. Красковский // САПР и графика. – 2004. – № 12. – С. 14 – 21.

54. Круциляк, Ю.М. Основы систем автоматизированного проектирования CAD/CAM/CAE: учеб. пособие / Ю.М. Круциляк – Магнитогорск: МГТУ, 2006. – 107 с.

55. Лопота, В.А. Проблемы развития и координации работ по критической технологии «Информационная интеграция и системная поддержка жизненного цикла продукции (CALS-, CAD-, CAM-, CAE-технологии)» / В.А. Лопота, А.В. Суворин // Качество и ИПИ (CALS)-технологии. – 2004. – № 1 (1). – С. 3 – 8.

56. Малютин, Н.В. Современный подход к реализации информационной технологии обеспечения качества РЭС на протяжении жизненного цикла / Н.В. Малютин // ИТПП. – 2000. – № 4. – С. 9 – 10.

57. Манохин, А.И. Обеспечение качества и надежности теплонагруженных радиоэлектронных средств / А.И. Манохин // Качество и ИПИ (CALS)-технологии. – 2006. – № 4 (12). – С. 2 – 7.

58. Моделирование электрических, тепловых и механических процессов в радиоэлектронной аппаратуре в контексте CALS-технологий / А.С. Шалумов [и др.] // Новые технологии проектирования изделий микроэлектроники: материалы 3 Междунар. науч.-техн. конф., Владимир, 10 – 11 дек. 2004 г. / ВлГУ. – Владимир: ВлГУ, 2004. – 23 с.
59. Муромцев, Ю.Л. Информационные технологии проектирования РЭС. Ч.1: Основные понятия, архитектура, принципы: учеб. пособие / Ю.Л. Муромцев, Л.П. Орлова, Д.Ю. Муромцев. – Тамбов: ТГТУ, 2004. – 96 с.
60. Надточий, И.Л. Проектирование и внедрение ERP-систем: учеб. пособие / И.Л. Надточий. – Челябинск: ЮУрГУ, 2003. – 92 с.
61. Никитин, А. PDM в вопросах и ответах / А. Никитин, С. Дмитриев // САПР и графика. – 2003. – № 5. – С. 12 – 15.
62. Обеспечение качества радиоэлектронной аппаратуры при концептуальном проектировании на основе CALS-технологии / В.В. Воловиков [и др.] // Качество и ИПИ (CALS)-технологии. – 2005. – № 4 (8). – С. 2 – 6.
63. Писарев, В.Н. Совершенствование программных средств для информационного обеспечения испытаний радиоэлектронной аппаратуры / В.Н. Писарев, А.О. Соколов // ИТПП. – 2003. – № 2. – С. 10 – 14.
64. Преображенский, А.П. САПР современных радиоэлектронных устройств и систем / А.П. Преображенский, Р.П. Юров // Вестн. Воронеж. ГТУ. – 2006. – Т. 2, № 3. – С. 35 – 37.
65. Реализация системного подхода при моделировании радиоэлектронных средств / А.С. Шалумов [и др.] // Качество и ИПИ (CALS)-технологии. – 2006. – № 4 (12). – С. 25 – 37.
66. Садовников, Д. Интегрированная автоматизированная система TDM/PDM/Workflow PartY PLUS v. 3.0 / Д. Садовников // САПР и графика. – 2002. – № 9. – С. 50 – 51.
67. Самохвалов, Е.И. Логистическое обеспечение и интеграция данных в CALS-системах / Е.И. Самохвалов // Конструкторско-технологическая информатика-2005= Computer science for design & technology: тр. V Междунар. конгр., Москва, 5 – 7 окт. 2005 г. / МГТУ «Станкин»; редкол.: А.А. Кутин (общ. ред.) [и др.]. – М.: «Станкин», Янус-К, 2005. – С. 284 – 286.
68. Силин, В.В. ADEM как важное звено CALS-технологий / В.В. Силин // САПР и графика. – 2005. – № 9. – С. 100 – 102.
69. Силин, В.В. ADEM как важное звено CALS-технологий / В.В. Силин // ИТПП. – 2005. – № 4. – С. 60 – 63.
70. Симонова, Л.А. Интегрированное информационное обеспечение процесса управления технологическими маршрутами в рамках ERP-системы / Л.А. Симонова, М.П. Руднев / Камск. гос. политехн. ин-т. – М.: Academia, 2005. – 285 с.
71. Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта: CAD/CAM/PDM-2004: тезисы 4-й Междунар. конф., Москва, 2 – 5 нояб. 2004 г. / Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН; редкол.: Е.И. Артамонов (общ. ред.) [и др.]. – М.: ИИУ, 2004. – 88 с.

72. Смирнов, К. Внедрение PLM-системы на Минском автомобильном заводе / К. Смирнов // САПР и графика. – 2003. – № 7. – С. 78 – 80.
73. Создание интегрированной системы автоматизированного проектирования и комплексного компьютерного моделирования высоконадежной электронной аппаратуры в рамках CALS-технологий / А.С. Шалумов [и др.] // EDA Express. – 2005. – № 11. – С. 9 – 15.
74. Создание отечественной проектной среды разработки микроэлектронных систем / В.К. Зольников [и др.] // Вестн. Воронеж. ГТУ. – 2006. – Т. 2, № 3. – С. 9 – 11.
75. Соломахина, Н.В. Жизненный цикл программного средства / Н.В. Соломахина, А.В. Турецкий, Н.В. Ципина // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. / Красноярск. ГТУ. – М.: Радио и связь, 2006. – С. 318 – 320.
76. Соломенцев, Ю.М. Концепции CALS-технологий / Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов // Автоматизация и соврем. технологии. – 2005. – № 9. – С. 3 – 9.
77. Соломенцев, Ю.М. Проблема создания компьютеризированных интегрированных производств / Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, С.А. Шептунов // Проблемы CALS-технологий: сб. науч. тр. – М., 1998. – С. 5 – 12.
78. Сравнительный анализ современных систем класса PDM/PLM российских производителей / А.А. Соловкин [и др.] // Качество и ИПИ (CALS)-технологии. – 2006. – №3 (11). – С. 24 – 34.
79. Стрекалов, А.Ф. Методы оценки эффективности внедрения CALS-технологий / А.Ф. Стрекалов, А.С. Астафьева // ИТПП. – 2006. – № 1. – С. 46 – 50.
80. Сумароков, С.В. Внедрение CALS-технологий на ОАО «Раменский приборостроительный завод» / С.В. Сумароков, В.П. Румянцев // Науч. сессия МИФИ-2003: сб. науч. тр. В 14 т. Т. 6. – М.: МИФИ, 2003. – С. 251 – 252.
81. Сухов, С.А. Современная стратегия производства промышленных изделий / С.А. Сухов // Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем: тр. 4 Всерос. науч.-практ. конф. (с участием стран СНГ), Ульяновск, 5 – 6 окт. 2004 г. / Мин-во образования и науки РФ, Админ. Ульяновск. обл., Ульяновск. гос. техн. ун-т, ОАО «Ульяновский механический з-д», Российское НТО РЭС им. А.С. Попова, Ульяновск. регион. отд. РНТО РЭС им. А.С. Попова, Ульяновск. научн. центр «Ноосферные знания и технологии» РАЕН. – Ульяновск: УлГТУ, 2004. – С. 135 – 137.
82. Токарев, Д.В. Вопросы внедрения систем обеспечения жизненного цикла изделия (PLM) / Д.В. Токарев, В.В. Яхричев // Вузовская наука-региону: материалы 3 Всерос. науч.-техн. конф., 23 февр. 2005 г. / Вологод. гос. техн. ун-т. – Т. 1. – Вологда: ВоГТУ, 2005. – С. 194 – 196.
83. Ушаков, Д. Математическое обеспечение для интеллектуальных PLM-решений / Д. Ушаков, С. Прейс // САПР и графика. – 2003. – № 12. – С. 51 – 53.
84. Фадеев, С.В. Стандарт STEP – основа интеграции систем автоматизации конструкторского и технологического проектирования / С.В. Фадеев // Вестн. Курган. гос. ун-та. – 2006. – № 1 (05). Сер. Техн. науки. Вып. 2. Ч. 2. – С. 4 – 6.
85. Чернопяттов, Е.А. Современные аспекты информационного обмена между CAD/CAM-системами / Е.А. Чернопяттов // Конструкторско-техноло-

гическая информатика-2000: тр. 4 Междунар. конгр. В 2 т. Т. 2. – М.: «Станкин», 2000. – С. 251 – 254.

86. Чиркова, С. ЛОЦМАН WorkFlow – современное средство управления производственными процессами / С. Чиркова // САПР и графика. – 2005. – № 11. – С. 30 – 33.

87. Шалумов, А.С. Информационная интеграция систем компьютерного моделирования физических процессов и САД-систем для создания высоконадежной радиоэлектронной аппаратуры в рамках CALS-технологий / А.С. Шалумов // Качество и ИПИ (CALS)-технологии. – 2005. – № 2 (6). – С. 35 – 38.

88. Шалумов, А.С. Опыт внедрения PDM-систем, САД-систем, системы АСОНИКА и их интеграции на предприятиях электронной промышленности / А.С. Шалумов, Ю.Н. Кофанов // Качество и ИПИ (CALS)-технологии. – 2005. – № 4 (8). – С. 24 – 30.

89. Шептунов, С.А. Жизненный цикл продукции / С.А. Шептунов. – М.: Янус-К, 2003. – 244 с.

90. Ширяев, Н. CALS, PDM, PLM, далее – везде... / Н. Ширяев // САПР и графика. – 2002. – № 12. – С. 48 – 49.

91. Ширяев, Н. Критерии сравнения систем TDM/PDM / Н. Ширяев // САПР и графика. – 2003. – № 2. – С. 80 – 83.

92. Ширяев, Н. Некоторые аспекты внедрения PLM-решения при комплексной автоматизации предприятия / Н. Ширяев // САПР и графика. – 2005. – № 1. – С. 68 – 70.

93. Ширяев, Н. Неочевидные проблемы, связанные с внедрением систем TDM/PDM / Н. Ширяев // САПР и графика. – 2001. – № 4. – С. 100 – 102.

94. Яцкевич, А. Инструментарий работы со STEP-данными / А. Яцкевич // САПР и графика. – 1999. – № 1. – С. 73 – 78.

95. Яцкевич, А. Построение интегрированной информационной среды предприятия на основе системы управления данными об изделии PDM STEP Suite / А. Яцкевич, Д. Страузов // САПР и графика. – 2002. – № 6. – С. 83 – 87.

96. Яцкевич, А. Управление инженерными изменениями при применении технологии PDM / А. Яцкевич, Д. Бороздин, Д. Карасев // Качество и ИПИ (CALS)-технологии. – 2004. – № 3 (3). – С. 25 – 30.

97. CALS (Поддержка жизненного цикла продукции): Руководство по применению / сост. А.Н. Давыдов [и др.]. – М.: Мин-во экономики РФ; НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика»; ГУП «ВИМИ», 2000. – 44 с.

— 208958 —

БИБЛИОТЕКА ПДУ

Учебное издание

Шестопалова Ольга Евгеньевна
Дровосекова Татьяна Николаевна

Интегрированные САПР
производства радиоэлектронных средств

Конспект лекций
для магистрантов специальности
1-40 80 04 «Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ»

Редактор *Т. А. Дарьянова*

Дизайн обложки *В. А. Виноградовой*

Подписано в печать 22.02.10. Формат 60x84 1/16. Гарнитура Таймс. Бумага офсетная.
Ризография. Усл. печ. л. 5,80. Уч.-изд. л. 5,54. Тираж 15 экз. Заказ 262.

Издатель и полиграфическое исполнение –
учреждение образования «Полоцкий государственный университет»

ЛИ № 02330/0548568 от 26.06.09

ЛП № 02330/0494256 от 27.05.09

211440, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29